

Валидация новой модели МКРЗ при ингаляционном поступлении водной формы трития

Репин В.С., Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Разин К.А.

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Публикация 134 Международной комиссии по радиологической защите вводит обновлённую биокинетическую модель внутреннего облучения тритием, что определяет актуальность ее применения при индивидуальном дозиметрическом контроле. Цель исследования – валидация модели Публикации 134 МКРЗ для оценки ингаляционного поступления трития по результатам измерений удельной активности трития в моче и концентрации водных паров трития в воздухе рабочих помещений. Материалы и методы: В исследовании участвовали пять человек, дважды находившихся на участке работ с тритием с интервалом 13 суток; каждое пребывание длилось 6 часов. Измеряли температуру и влажность воздуха, отбирали пробы конденсата воздуха на элемент Пельтье и пробы мочи. Отбор проб мочи продолжали в последующие дни после контакта. Валидацию проводили сопоставлением расчетных данных с экспериментальными значениями при идентичных сценариях поступления водной формы трития. Результаты исследования и их обсуждение: Модель публикации 134 Международной комиссии по радиологической защите дает оценки уровней ингаляционного поступления водной формы трития, сопоставимые с моделью публикации 56, и точнее отражает динамику содержания трития в первые 12 часов после пролонгированного поступления. Для более точных оценок поступления трития по результатам измерений в пробах мочи, отобранных через неделю и более, требуется коррекция по периоду полувыведения трития, которую проще выполнить по модели публикации 56. Принятые в исследовании объёмы дыхания для сидячей работы (0,54 и 0,39 м³/ч для мужчин и женщин соответственно) дали заниженные оценки поступления по сравнению с оценками, выполненными по моче; при объёмах дыхания для лёгкой работы рассчитанные уровни поступления превышают оценки по моче. Заключение: Результаты валидации новой модели МКРЗ по тритию показали, что она имеет преимущества перед старой только при интерпретации результатов измерения концентрации в моче, полученных в первые 12 часов от начала поступления, что чрезвычайно важно при контроле аварийного поступления.

Ключевые слова: тритий, биокинетическая модель, Международная комиссия по радиологической защите, контроль, моча, воздух.

Введение

Основным методом контроля за поступлением трития (³H) в организм работников предприятий, осуществляющих обращение с тритием и его соединениями, является контроль содержания данного радионуклида в моче [1, 2]. В настоящее время в основу контроля внутреннего облучения положена модель, опубликованная в публикации 56 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [3], реализованная, в частности, в методических указаниях МУ 2.6.1.15-02¹. В соответствии с данной моделью функция удержания трития R(t) со временем от поступления (t) имеет вид выражения (1):

$$R(t) = 0,97 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{10}t} + 0,03 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{40}t}, \quad (1)$$

где t – время от момента поступления, сут.

Как видно из уравнения (1), 97 % трития выводится из организма с периодом полувыведения 10 суток и 3 % – с периодом полувыведения 40 суток. Вторая компонента приписывается органически связанному тритию (ОСТ).

Для количественного описания ингаляционного поступления соединений трития, включая водную форму трития (НТО), МКРЗ предложила использовать модель респираторного тракта, описанную в Публикации 66 МКРЗ [4], которая в сочетании с биокинетической моделью обмена трития, предложенной в 2016 году в Публикации 134 МКРЗ (новая модель), позволяет дать более точное количественное описание ранних процессов переноса радионуклида из крови в остальные жидкости тела в форме НТО и в форме органических соединений [5].

Альтернативным методом контроля за поступлением трития является измерение его концентрации в воздухе [1]. Оценка поступления за рабочий день в этом случае может быть выполнена по формуле (2):

¹Тритий и его соединения. Контроль величины индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения при поступлении в организм человека: методические указания МУ 2.6.1.15-02. Утв. 16.04.2002 и 18.06.2002; введены в действие 18.06.2002; введены впервые. М.: Минатом России, Минздрав России, 2002. 27 с. [Tritium and its compounds. Monitoring of the individual effective dose from internal exposure following intake into the human body: Methodological guidelines MU 2.6.1.15-02; Moscow: Minatom of Russia, Ministry of Health of Russia, 2002. 27 p. (In Russ.)]

Репин Виктор Степанович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева

Адрес для переписки: 197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира 8; Email: v.repin@niirg.ru

$$A = VA_{\text{НТО}} \cdot V \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где $VA_{\text{НТО}}$ – средняя объемная активность трития в воздухе, Бк/м³; V – объем вдыхаемого воздуха, м³/час; Δt – продолжительность рабочего дня, час.

Оба метода контроля дают приблизительную оценку поступления, поскольку зависят от физиологических особенностей организма. Точность контроля поступления трития по пробам мочи зависит от особенностей водного обмена и периодичности контроля; при контроле концентрации трития в воздухе – от объема дыхания, физической активности, а также от различий концентрации трития на рабочих местах и эффективности вентиляции.

Поскольку в настоящее время контроль доз облучения при поступлении трития осуществляется по модели 56 публикации МКРЗ, представляет интерес выяснить возможности практического использования новой модели из 134 публикации МКРЗ [5] и сравнить обе модели.

Цель исследования – валидация новой модели МКРЗ для количественной оценки уровней ингаляционного поступления трития у человека на основе экспериментальных данных об удельной активности трития в моче и данных о концентрации НТО в воздухе рабочих помещений.

Материалы и методы

Для валидации модели использованы три подхода:

- сопоставление результатов моделирования скорости выведения трития с мочой при ингаляционном поступлении НТО с результатами измерений скорости выведения

трития с мочой у лиц, вдыхавших пары НТО в производственных помещениях;

- сравнительная оценка уровней поступления трития лицам, вдыхавшим пары НТО по моделям 56 и 134 публикации МКРЗ;

- сопоставление результатов оценки поступления трития по новой модели с результатами оценки поступления по данным измерения концентрации НТО в пробах конденсата воздушной влаги в производственных помещениях.

Исследование с целью валидации проведено на одном из предприятий Санкт-Петербурга, в производственных помещениях которого ведутся работы с тритием. Производственный участок состоит из трех смежных помещений (№№ 1-3). Вход в комнаты №№ 1 и 3, где проводят работы с тритием осуществляется через проходное помещение № 2. Все помещения оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией; площадь помещений составляет 30, 40 и 15 м².

В исследовании участвовали 5 человек, не имевших контакта с тритием на производстве. Параметры участников исследования с индексами P1 – P5 приведены в таблице 1. Величина суточного диуреза (колонка 6) накануне исследования оценивалась участниками индивидуально посредством сбора порций мочи в течение 3 суток, измерения объемов порций в мерных стаканах, расчета суточных объемов мочи и их усреднения. Скорость выведения трития с мочой накануне входа в производственные помещения (колонка 8) оценивалась для каждого участника путем умножения концентрации трития в моче Бк/л (колонка 7) на среднее индивидуальное значение суточного диуреза, л/сут (колонка 6).

Таблица 1. Антропометрические данные и физиологические параметры участников исследования

[Table 1. Anthropometric data and physiological parameters of study participants]

Индекс [Participants ID]	Пол [Sex]	Возраст, лет [Age, years]	Вес, кг [Weight, kg]	Рост, см [Height, sm]	Суточный ди- урез, л/сут [Daily urine out- put, l/day],	Удельная актив- ность мочи, Бк/л [Urine specific ac- tivity, Bq/l]	Скорость выведения НТО с мочой, Бк/сут [Rate of НТО excre- tion with urine, Bq/day]
P1	М [M]	79	81	171	1,8±0,2	3,0±0,2	5,4±0,7
P2	Ж [F]	66	64	157	1,6±0,1	3,2±0,1	5,1±0,4
P3	Ж [F]	42	58,5	167	1,1±0,1	3,4±0,3	3,7±0,5
P4	М [M]	29	67,5	175	1,6±0,2	3,2±0,3	5,1±0,8
P5	М [M]	26	61	175	1,8±0,3	3,0±0,2	5,2±0,9

Исследование включало два эпизода пребывания участников в производственных помещениях с интервалом 13 суток и продолжительностью 6 часов. Эпизоды отличались между собой видами обращения с тритием и ожидаемыми различиями уровней ингаляционного поступления. В течение всего времени пребывания участников исследования в производственных помещениях, а также в течение двух последующих суток после завершения каждого эпизода исследований, отбирали пробы мочи. Пробы мочи также отбирали на 12-е сутки перед началом второго эпизода и на 20-е сутки.

Отбор проб мочи у каждого участника осуществлялся в индивидуальные, фиксируемые моменты времени. Отсчет времени производили от момента входа в рабочие помещения в первый день исследования. Неопределенность измерений не превышала 15 %.

Измерение удельной активности трития в пробах мочи до и после входа в производственные помещения выполняли в счетных образцах, подготовленных методом двойной дистилляции с добавлением перманганата калия (KMnO₄) в качестве окисляющего агента. Подготовленные счетные образцы выдерживали в темноте в течение 12 часов для подавления хемилюминесценции перед измерением. Измерения выполнены на сцинтилляционном спектрометре Quantulus 1220.

Оценка скорости выведения трития с мочой производилась по результатам измерений концентрации трития в моче в моменты отбора проб и умножения концентрации (Бк/л) на суточный объем мочи, который в соответствии с Публикацией 89 МКРЗ принимался равным 1,2 л/сут для женщин и 1,6 л/сут для мужчин. Уровни, предложенные в 89 публика-

ции, несколько отличаются от персональных данных, приведенных в таблице 1, но являются более предпочтительными, поскольку персональные значения диуреза были получены в нерабочие дни на ограниченной выборке и были использованы только для оценки скорости выведения трития с мочой до начала исследования. Оценки поступления трития по содержанию его в моче в дни пребывания в рабочих помещениях производились на основе табулированной функции отклика при шестичасовом ингаляционном поступлении со скоростью 1 Бк/сут.

Пробы воздушной влаги отбирали методом вымораживания на элементе Пельтье. Полученные в процессе вымораживания пробы конденсата объемом 2 мл смешивали с жидким сцинтиллятором и измеряли на жидкостном спектрометре Quantulus 1220 для определения удельной активности трития. Расчет объемной активности $VA_{НТО}$ трития в воздухе производился по формуле (3):

$$VA_{НТО} = \frac{SA_{НТО}}{1000} \cdot Ah, \quad (3)$$

где $SA_{НТО}$ – удельная активность трития в счетном образце, Бк/кг; Ah – абсолютная влажность воздуха г/м³.

Расчет абсолютной влажности (A_h) в воздухе рабочих помещений производился по формуле (4) по результатам показаний цифрового гигрометра ТМФЦ-99 относительной влажности (R_h) и температуры (T) [6, 7]:

$$A_h = 216,7 \frac{R_h}{100} \cdot 6,112 \cdot e^{\frac{17,67 \cdot T}{T+243,5}} \quad (4)$$

Неопределенность измерений и оценки абсолютной влажности не превышала 10 %.

Таким образом, оба эпизода пребывания участников в течение 6 часов в производственных помещениях позволили получить набор фактических данных, характеризующих связь между объемной активностью трития в воздухе и скоростью его выведения с мочой.

Интерпретация результатов измерений и валидация модели выполнена посредством моделирования сценария поступления трития в часы пребывания участников в производственных помещениях. Моделирование ингаляционного поступления трития по новой модели МКРЗ проводилось для длительности ингаляционного поступления паров НТО в течение 0,25 суток со скоростью 1 Бк/сут. Моделирование производили в среде MATLAB R2020b (лицензия № 574592). Модель ингаляционного поступления, наряду с моделью трития, включала модифицированную модель респираторного тракта (Публикация 134 МКРЗ) [5] и модель желудочно-кишечного тракта (Публикация 100 МКРЗ) [8]. Целью моделирования было получение табулированных значений скорости выведения трития с мочой и калом и общего содержания трития в теле, в мягких тканях и в крови (рис. 1).

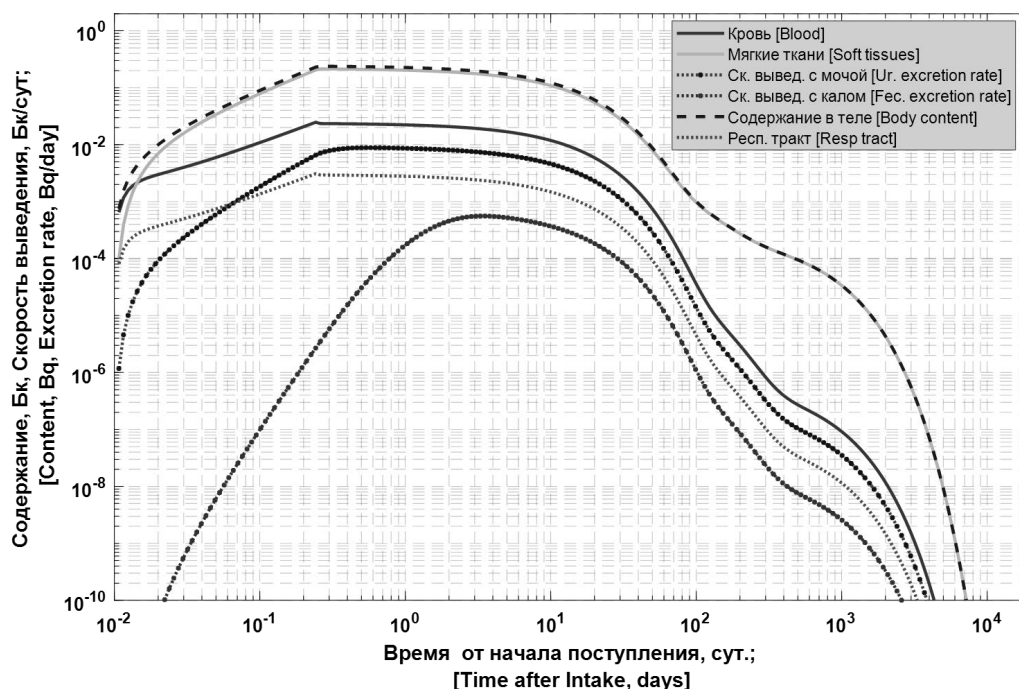


Рис. 1. Содержание трития в теле и скорости выведения с мочой и калом в зависимости от времени при 6-часовой ингаляции водных паров трития со скоростью 1 Бк/сут

[Fig. 1. Tritium retention in the body and excretion rates via urine and feces for a 6-hour inhalation exposure to tritiated water vapor (НТО) at 1 Bq/day]

Табулированные значения скорости выведения трития с мочой и его содержание в теле были приняты за основу расчетов в качестве функций отклика на пролонгированное шестичасовое воздействие и использованы для валидации новой модели поведения трития в организме.

Следует отметить, что, в соответствии с новой моделью,

с мочой выводится только 55 % трития, тогда как 45 % его покидает организм с потом, калом и посредством выдыхания паров воды.

Для валидации модели по содержанию трития в организме принималось, что его концентрация в моче и в жидкостях тела идентичны, то есть содержание трития в теле

в каждый момент времени определяется массой жидкости в организме. Масса жидкости, в соответствии с публикацией 89 МКРЗ, может быть рассчитана по массе тела с учетом возраста [9]. Данный подход позволяет избежать неопределенностей, связанных с долями трития, выводимого с мочой и потом.

Общая идея оценки поступления трития в организм по новой модели заключалась в сопоставлении результатов

моделирования с результатами измерений проб мочи и подбора коэффициентов масштабирования, обеспечивающих наилучшее согласие между результатами моделирования и результатами измерений трития в моче за два периода пребывания. При двукратном ингаляционном поступлении учитывалась скорость выведения радионуклида с мочой за счет первого поступления. Графическое пояснение сути сопоставления результатов моделирования с результатами измерений показано на рисунке 2.

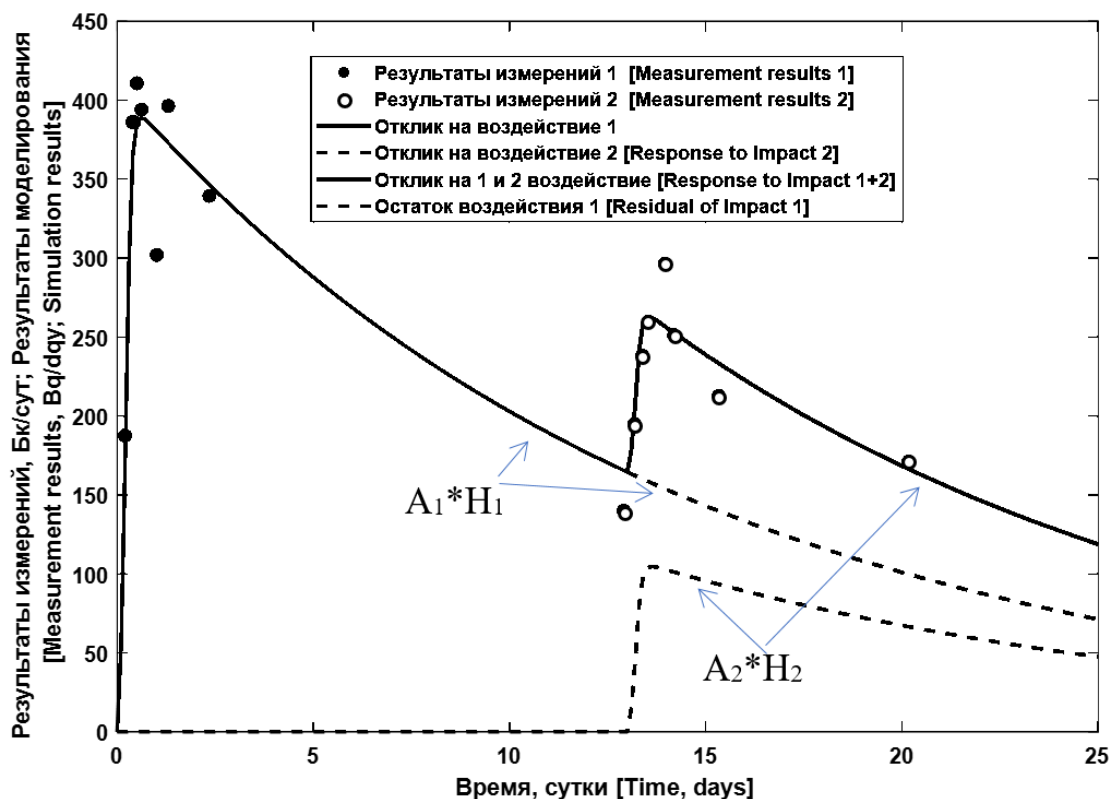


Рис. 2. Пример подбора коэффициентов масштабирования для сценария двукратного ингаляционного поступления трития
[Fig. 2. Example of selecting scaling factors for the scenario of repeated tritium inhalation exposure]

Расчет коэффициентов масштабирования (уровней поступления НТО) для первого и второго эпизода поступления трития производился методом наименьших квадратов по формуле (5), представленной в векторном виде:

$$A = (H' \cdot H) \backslash (H' \cdot y), \quad (5)$$

где H' – числовые значения векторов функции отклика в моменты отбора проб мочи для первого и второго периода, учитывающие сдвиг по времени между эпизодами;
 y – вектор результатов измерений;
 A – вектор коэффициентов масштабирования.

Статистическая обработка результатов измерений осуществлялась средствами программного обеспечения MATLAB и MS Excel.

Количественная оценка отклонений между экспериментальными измерениями и предсказаниями по модели оценивалась по сумме квадратов ошибок SSE:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

где y_i – измеренное значение;
 $\hat{y}_i$ – значение, рассчитанное моделью;
 n – число наблюдений.

Результаты исследований

Результаты измерений параметров производственной среды в 1-й и 13-й день исследований представлены в таблице 2. Вход в блок помещений осуществлялся через комнату 2, которая была проходной между комнатами 1 и 3. Работы с тритием в дни исследований в этой комнате (№ 2) не проводились. Оценки абсолютной влажности, представленные в таблице 2, выполнены на основании данных о температуре и относительной влажности по формуле (4).

В таблице 3 приведены результаты измерений удельной активности трития в пробах конденсата (YA), отобранных в дни проведения исследований в производственных помещениях, а также результаты расчета объемной активности трития ($VA_{НТО}$) в воздухе, выполненные по формуле (3).

Таблица 2. Параметры микроклимата в производственных помещениях в период исследований
[Table 2. Indoor microclimate parameters at the worksites during the study]

Параметр [Parameter]	Помещение 1 [Room 1]	Помещение 2 [Room 2]	Помещение 3 [Room 3]
1-й день – эпизод 1 [1-th day – episode 1]			
Температура, °C [Temperature, °C]	21,8 ± 1,2	22,8 ± 0,9	22,6 ± 0,9
Относительная влажность, % [Relative humidity, %]	51,4 ± 2,8	48,3 ± 2,1	49,2 ± 1,9
Абсолютная влажность, г/м³ [Absolute humidity, g/m³]	9,8 ± 0,3	9,8 ± 0,4	9,8 ± 0,3
13-й день – эпизод 2 [13-th day – episode 2]			
Температура, °C [Temperature, °C]	23,0	23,5 ± 0,9	22,8 ± 1,0
Относительная влажность, % [Relative humidity, %]	48,2	46,0 ± 1,3	49,5 ± 3,4
Абсолютная влажность, г/м³ [Absolute humidity, g/m³]	9,9	9,7 ± 0,3	10,1 ± 0,2

Таблица 3. Удельная активность трития (УА) в пробах конденсата и объемная активность трития (ВА_{нто}) в воздухе рабочих помещений
[Table 3. Activity concentration of tritium (SA) in condensate samples and volumetric activity of tritium (VA_{нто}) in the air of the working rooms]

Помещение 1 [Room 1]		Помещение 2 [Room 2]		Помещение 3 [Room 3]	
УА ×10 ³ Бк/кг [SA ×10 ³ Bq/kg]	V _{AHTO} ×10 ³ Бк/м ³ [V _{AHTO} ×10 ³ Bq/m ³]	УА ×10 ³ Бк/кг [SA ×10 ³ Bq/kg]	V _{AHTO} ×10 ³ Бк/м ³ [V _{AHTO} ×10 ³ Bq/m ³]	УА ×10 ³ Бк/кг [SA ×10 ³ Bq/kg]	V _{AHTO} ×10 ³ Бк/м ³ [V _{AHTO} ×10 ³ Bq/m ³]
1-й день – эпизод 1 [1-th day – episode 1]					
72,4	0,688	38,8	0,36	120	1,14
115	1,10	235	2,65	59,5	0,55
338	3,61	184	1,88	380	4,08
901	8,55	164	1,59	257	2,64
–	–	115	0,99	241	2,56
–	–	–	–	15,6	0,14
357 ± 191*	3,49 ± 1,81*	147 ± 33*	1,50 ± 0,39*	179 ± 56*	1,85 ± 0,61*
CV=0,53		CV=0,19		CV=0,35	
13-й день – эпизод 2 [13-th day – episode 2]					
73,6	0,73	89,2	0,88	135	1,34
71,2	0,71	39,4	0,39	72,0	0,71
–	–	35,5	0,35	59,9	0,59
–	–	61,3	0,61	63,1	0,62
–	–	48,8	0,48	91,6	0,91
72,7 ± 1,20*	0,72 ± 0,01*	54,8 ± 9,7*	0,54 ± 0,1*	84,3 ± 13,8*	0,84 ± 0,14*
CV=0,02		CV=0,17		CV=0,16	

Величины в таблице следует умножать на 10³ в соответствующих единицах измерения. [The values in the table should be multiplied by 10³ in the corresponding units of measurement.]

* Ср. арифм. ± ст. ош. [mean ± SE]

Анализ данных таблицы 3 показывает, что в первый день исследований объемная активность трития в воздухе существенно варьировала во всех рабочих помещениях; при этом наибольшие средние значения объемной активности и максимальные значения коэффициента вариации (CV) были зарегистрированы в помещении 1. На 13-й день исследований значения объемной активности и коэффициенты вариации

были ниже. Данные факты были приняты во внимание при оценке уровней поступления трития по объемной активности в воздухе, поскольку доля времени пребывания участников исследования в каждом из помещений имела принципиальное значение.

В таблице 4 представлены результаты измерений удельной активности трития в пробах мочи.

Таблица 4. Удельная активность трития (УА) в пробах мочи участников исследования в период и после пребывания на участках работ с тритием

[Table 4. Activity concentration of tritium (SA) in urine samples of study participants during and after the stay in tritium work areas]

Индекс участника исследований [Participant's ID]									
P1		P2		P3		P4		P5	
Время, сут [time, day]	УА, Бк/кг [SA, Bq/kg]	Время, сут [T, day]	УА, Бк/кг [SA, Bq/kg]	Время, сут [T, day]	УА, Бк/кг [SA, Bq/kg]	Время, сут [T, day]	УА, Бк/кг [SA, Bq/kg]	Время, сут [T, day]	УА, Бк/кг [SA, Bq/kg]
1-й (эпизод пребывания) [1-th episode of stay]									
0,19	42	0,09	5	0,09	12	0,21	55	0,11	17
0,48	195	0,26	151	0,40	196	0,39	241	0,42	398
0,59	199	0,34	204	0,68	241	0,43	241	0,57	386
0,91	195	0,43	186	0,97	403	0,50	257	0,98	375
1,01	176	0,58	204	1,33	246	0,62	246	1,27	320
1,23	192	0,96	191	2,19	207	1,01	189	2,11	310
2,38	162	1,09	193	12,90	91	1,30	248	12,91	142
12,90	90	2,18	164	–	–	2,35	212	–	–
–	–	12,90	42	–	–	12,91	88	–	–
13-й день (второй эпизод пребывания) [13-th day (2-nd episode of stay)]									
13,15	122	13,10	46	13,10	123	13,20	122	13,02	129
13,38	164	13,30	88	13,30	151	13,40	149	13,22	141
13,56	169	13,40	108	13,50	174	13,50	162	13,48	128
13,91	162	13,50	115	13,60	149	14,00	185	14,46	190
14,19	167	13,90	116	13,70	154	14,20	157	15,20	173
15,19	142	14,00	113	14,00	148	15,30	133	–	–
20,25	94	14,40	104	14,40	144	20,20	107	–	–
–	–	15,30	93	15,30	133	–	–	–	–
–	–	20,40	51	–	–	–	–	–	–

Из результатов, представленных в таблице 4, следует, что уже в первые часы пребывания в рабочих помещениях удельная активность трития в пробах мочи превышала уровни, установленные до начала входа в производственные помещения (таблица 1, колонка 7). Следует также отметить, что максимальные уровни трития в моче у участников исследования варьировали в диапазоне от 200 до 400 Бк/кг. Уровни трития в моче на 13-й день пребывания были ниже, чем в первый день.

Сопоставление результатов моделирования с результатами измерений и оценки скорости выведения трития с мочой

Результаты сопоставления скоростей выведения трития, рассчитанных по модели, с результатами оценки наблюдаемых скоростей выведения трития с мочой представлены на рисунке 3.

На рисунке 3 видно, что измеренное содержание трития в пробах мочи, отобранных в первый и последующие

дни пребывания, находились в удовлетворительном согласии с оценками по модели с момента поступления в первые двое суток. Вместе с тем, содержание трития в пробах мочи перед вторым периодом пребывания участников P2, P4 и P5 в рабочих помещениях (помещения №№ 1, 3) оказалось ниже моделируемых значений, что, по-видимому, связано с тем, что индивидуальные периоды полувыведения трития могут отличаться от периода 10 суток. Это обстоятельство не позволяет точно оценить уровень поступления на 13-й день, поскольку почти все модельные кривые лежат выше фактических уровней, зарегистрированных накануне.

По результатам измерений скорости выведения трития в первые 12 суток были даны оценки периодов полувыведения каждого участника, представленные в таблице 5. Фактические данные могут несколько отличаться от приведенных в таблице 5, поскольку не предусматривался отбор проб мочи на 3-12 сутки.

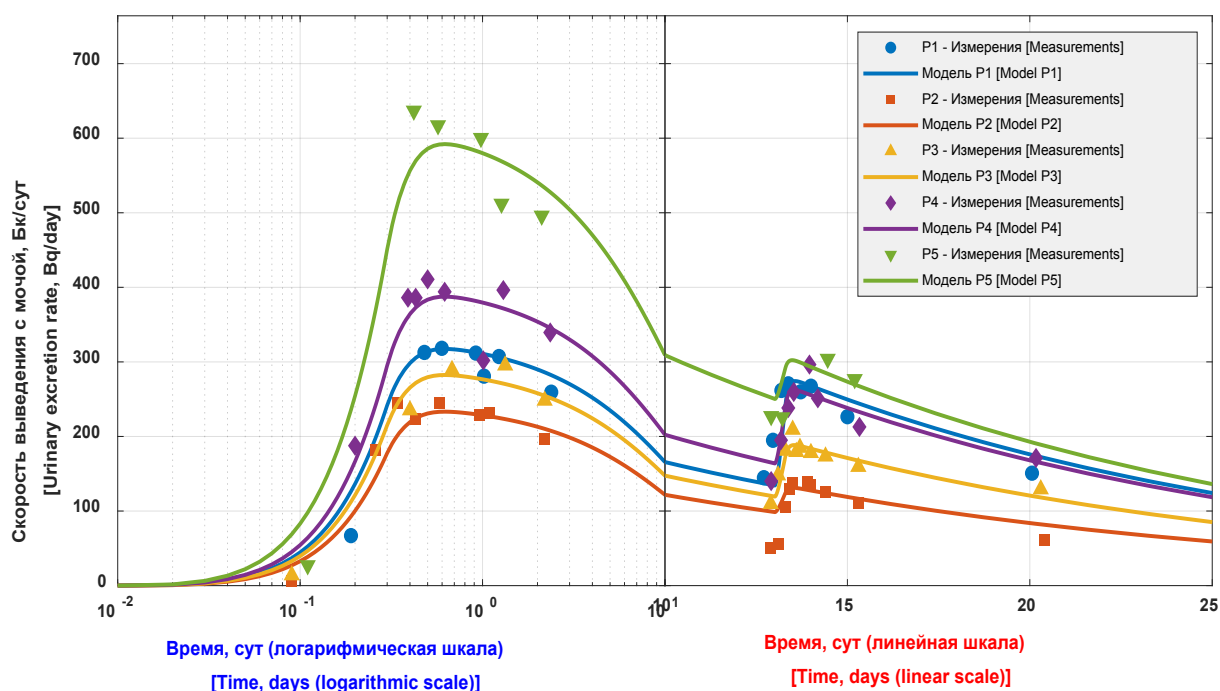


Рис. 3. Сопоставление результатов измерений скорости выведения трития с мочой участников исследования с результатами моделирования на основе новой модели МКРЗ

[Fig.3. Comparison of the results of measurements of the rate of excretion of tritium in the urine of the study participants with the results of modeling based on the new ICRP model]

Таблица 5. Результаты оценки индивидуальных периодов полувыведения трития у участников исследования

[Table 5. Estimation of individual half-life of tritium in study participants]

Индекс участников исследований [Participants ID]	Период полувыведения, сут [Half-life, day]	Константа скорости выведения, сут ⁻¹ [Elimination rate constant, day ⁻¹]
P1	9,6	0,072
P2	5,5	0,126
P3	9,1	0,076
P4	9,1	0,076
P5	8,7	0,080

Расчет функций отклика по скорости выведения трития с мочой для уточненных периодов полувыведения выполнен, как на основе модели 56 публикации МКРЗ, так и по модели публикации 134. В последнем случае персонализация периода полувыведения производилась посредством изменения константы скорости выведения трития из крови в экскреты. Функции удержания $R(t)$ и функции выведения с мочой $U(t)$ при поступлении трития в течение 6 часов на основе модели 56 публикации МКРЗ представлены уравнениями (6) и (7).

$$\begin{cases} R(t) = \frac{1}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \text{ при } t \leq 0,25 \text{ сут} \\ R(t) = R(0,25) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \text{ при } t > 0,25 \text{ сут} \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} U(t) = 0,55 \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \text{ при } t \leq 0,25 \text{ сут} \\ U(t) = U(0,25) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \text{ при } t > 0,25 \text{ сут} \end{cases}, \quad (7)$$

где λ - константа скорости выведения, сут⁻¹;
0,25 – время прекращения поступления трития в организм, сут;

0,55 - доля трития, выводимая с мочой, величина которой выбрана такой же, как и в новой модели МКРЗ.

Для наглядности, сопоставление функций отклика для скорости выведения трития с мочой, полученных с использованием соотношений (7) и на основе моделирования по новой модели МКРЗ для периода полувыведения 10 суток показано на рисунке 4.

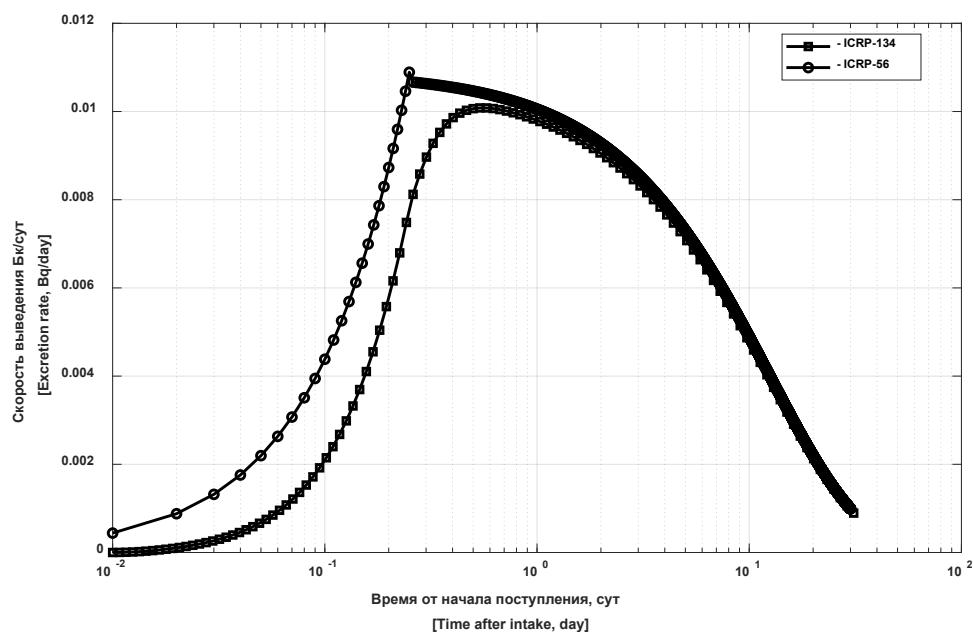


Рис. 4. Результаты сопоставления функций отклика для скорости выведения трития с мочой по моделям публикаций 56 и 134 МКРЗ при пролонгированном поступлении в течение 6 часов

[Fig. 4. Comparison of tritium retention functions of urinary excretion rates based on models 56 and 134 of the ICRP publications with prolonged intake over 6 hours]

Из рисунка 4 видно, что модель 134 публикации МКРЗ иначе отражает динамику выведения в первые 12 часов и графики функций выведения становятся близкими спустя 0,5 суток от начала поступления. Таким образом, если при оценке уровней поступления исключать из анализа результаты измерений, полученные в течение первых 12 часов, то

обе функции могут использоваться для расчетов поступления как в стандартном варианте модели, так и с учетом персонализированных периодов полувыведения.

Кривые динамики выведения с мочой при ингаляционном поступлении трития в 1-й и 13-й день с учетом персонализированных периодов полувыведения показаны на рисунке 5.

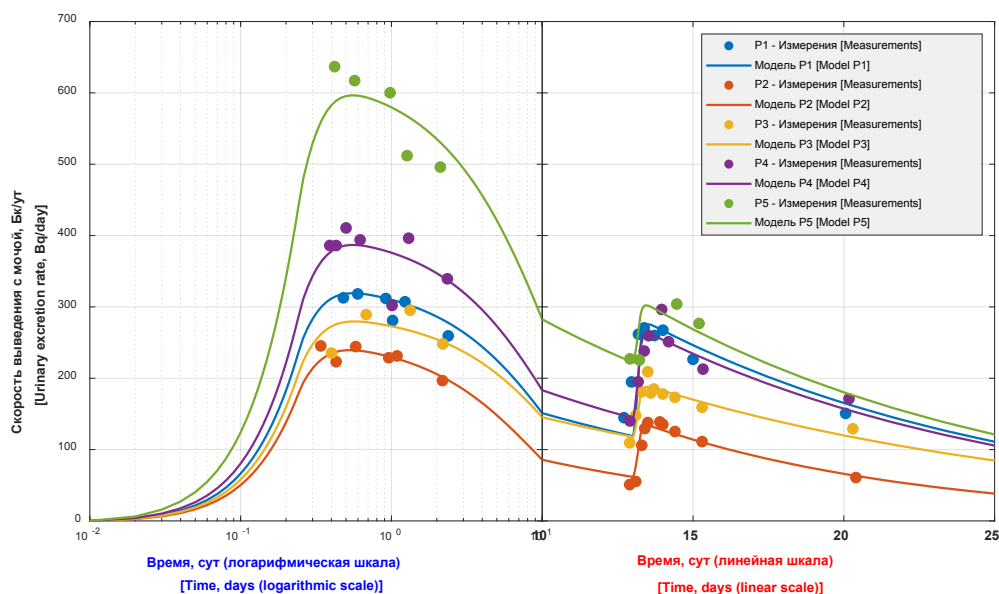


Рис. 5. Сопоставление результатов измерений скорости выведения трития с мочой у участников исследования с результатами моделирования на основе персонализированных периодов полувыведения по новой модели МКРЗ

[Fig. 5. Comparison of urine tritium elimination rate measurements from study participants with simulations based on the personalized elimination half-life using the new ICRP model]

Сопоставляя графики на рисунке 3 и на рисунке 5 визуально, можно видеть, что модельные кривые после 13 суток лежат существенно ближе к результатам измерений. Это подтверждается и количественно по разнице суммы квадратов ошибок SSE между результатами измерений и модельными кривыми для участников P2 и P5, у которых периоды

полувыведения НТО заметно отличались от периодов полувыведения других участников, представленных в таблице 5. Сумма квадратов отклонений участников P2 и P5 уменьшилась в 1,7 и 1,3 раза соответственно.

Таблица 6. Сумма квадратов ошибок (SSE) между результатами измерений и расчетами по модели МКРЗ-134

[Table 6. Sum of squared errors (SSE) between measured values and ICRP-134 model predictions]

Индекс участников [Participants ID]	Период полувыведения, сут [Half-life, day]	SSE по модели МКРЗ-134 (A) [SSE for the ICRP-134 model (A)]	SSE по модели МКРЗ-134 с учетом периода полувыведения (B) [SSE for the ICRP-134 model accounting for the biological half-life (B)]	Коэффициент снижения A/B [Reduction factor A/B]
P2	5,5	23	13,7	1,7
P5	8,7	47,6	36,3	1,3

Сравнительная оценка уровней поступления трития по моделям 56 и 134 публикаций МКРЗ

Оценки уровней поступления трития по скорости выведения трития с мочой выполнены посредством расчета коэффициентов масштабирования функции отклика в соответствии с соотношением (5) для каждого эпизода пребывания.

Оценки уровней поступления трития по содержанию в теле, как было отмечено выше, не зависят от долей трития,

выводимых с потом и мочой, поскольку концентрации трития в моче и в жидкостях тела не отличаются. Данный вариант оценки производится на основе функции отклика, характеризующей содержание трития в теле при непрерывном ингаляционном поступлении радионуклида в форме НТО в течение 6 часов. Результаты расчетов массы жидкости в теле представлены в таблице 7. Содержание трития в теле участников исследования оценивалось при этом по текущей концентрации трития в моче.

Таблица 7. Результаты оценки массы жидкости в теле участников исследований

[Table 7. Results of body fluid mass assessment of the study participants]

Индекс участника исследований [Participant's ID]	Пол [Sex]	Возраст, лет [Age, years]	Вес, кг [Weight, kg]	Масса мягких тканей [Soft tissue mass, kg]	Масса жидкости, кг [Fluid weight, kg]
P1	М	79	81	58	43
P2	Ж	66	64	37	27
P3	Ж	42	58	42	31
P4	М	29	67	55	40
P5	М	26	61	50	37

Сопоставление результатов оценки уровней поступления трития, выполненных по новой модели МКРЗ и по модели 56 публикации для вариантов оценки по скорости выведения с

мочой и по результатам оценки содержания в теле, с учетом персонализированных периодов полувыведения, представлено в таблице 8.

Таблица 8. Результаты оценки уровней поступления трития по моделям 56 и 134 публикаций

[Table 8. Tritium input results from models 56 and 134 publications]

Индекс участника исследований [Participant ID]	1-й день – эпизод 1 [1-th day – episode 1]				13-й день – эпизод 2 [13-th day – episode 2]			
	Ur ₁₃₄ , 10 ³ Бк/сут	Ur ₅₆ , 10 ³ Бк/сут	Wb ₁₃₄ , 10 ³ Бк	Wb ₅₆ , 10 ³ Бк	Ur ₁₃₄ , 10 ³ Бк/сут	Ur ₅₆ , 10 ³ Бк/сут	Wb ₁₃₄ , 10 ³ Бк	Wb ₅₆ , 10 ³ Бк
P1	7,91 ± 0,33	7,96 ± 0,28	9,01 ± 0,16	9,25 ± 0,18	4,01 ± 0,42	3,92 ± 0,34	4,41 ± 0,18	4,54 ± 0,20
P2	4,37 ± 0,09	4,37 ± 0,12	5,75 ± 0,15	5,95 ± 0,16	1,37 ± 0,09	1,34 ± 0,12	1,74 ± 0,15	1,83 ± 0,16
P3	7,89 ± 0,25	7,85 ± 0,27	7,63 ± 0,26	7,80 ± 0,27	2,10 ± 0,22	2,12 ± 0,24	2,02 ± 0,23	2,11 ± 0,24
P4	9,59 ± 0,27	9,60 ± 0,29	10,29 ± 0,31	10,55 ± 0,32	3,08 ± 0,34	2,99 ± 0,35	3,18 ± 0,37	3,29 ± 0,39

Индекс участника исследований [Participant ID]	1-й день – эпизод 1 [1-th day – episode 1]				13-й день – эпизод 2 [13-th day – episode 2]			
	Ur ₁₃₄ , 10 ³ Бк/сут	Ur ₅₆ , 10 ³ Бк/сут	Wb ₁₃₄ , 10 ³ Бк	Wb ₅₆ , 10 ³ Бк	Ur ₁₃₄ , 10 ³ Бк/сут	Ur ₅₆ , 10 ³ Бк/сут	Wb ₁₃₄ , 10 ³ Бк	Wb ₅₆ , 10 ³ Бк
P5	14,79 ± 0,45	14,92 ± 0,47	14,80 ± 0,36	15,19 ± 0,36	2,19 ± 0,70	1,85 ± 0,67	2,63 ± 0,63	2,81 ± 0,63

Величины в таблице следует умножать на 10³ в соответствующих единицах измерения. [Note: The values in the table should be multiplied by 10³ in the corresponding units of measurement.]

Обозначения в таблице: Ur₁₃₄ – оценка поступления трития по скорости выведения трития с мочой по модели публикации 134 МКРЗ; Ur₅₆ – оценка поступления трития по скорости выведения трития с мочой по модели публикации 56 МКРЗ; Wb₁₃₄ – оценка поступления трития по содержанию в теле по модели публикации 134 МКРЗ; Wb₅₆ – оценка поступления трития по содержанию в теле по модели публикации 56 МКРЗ.

[Symbols in the table: Ur₁₃₄ - evaluation of tritium intake by the rate of excretion of tritium in urine according to the publication model 134 ICRP; Ur₅₆ - evaluation of tritium intake by the rate of excretion of tritium in urine according to the publication model 56 ICRP; Wb₁₃₄ - assessment of tritium intake by body content according to the publication model 134 ICRP; Wb₅₆ - assessment of tritium intake by body content according to the ICRP publication model 56.]

Из таблицы 8 следует, что все варианты оценки уровней поступления с учетом персонализированных периодов полувыведения дают близкие результаты как в первый, так и в 13-й день. Максимальные различия в 1-й день не превышают 25 %, а на 13-й – 30 %.

Для выявления того, насколько важным является учет

периода полувыведения трития было выполнено сопоставление результатов оценки уровней поступления по новой модели МКРЗ с модификацией модели для индивидуального периода полувыведения трития и для периода 10 суток, принятого в модели. Результаты сопоставления показаны на рисунке 6.

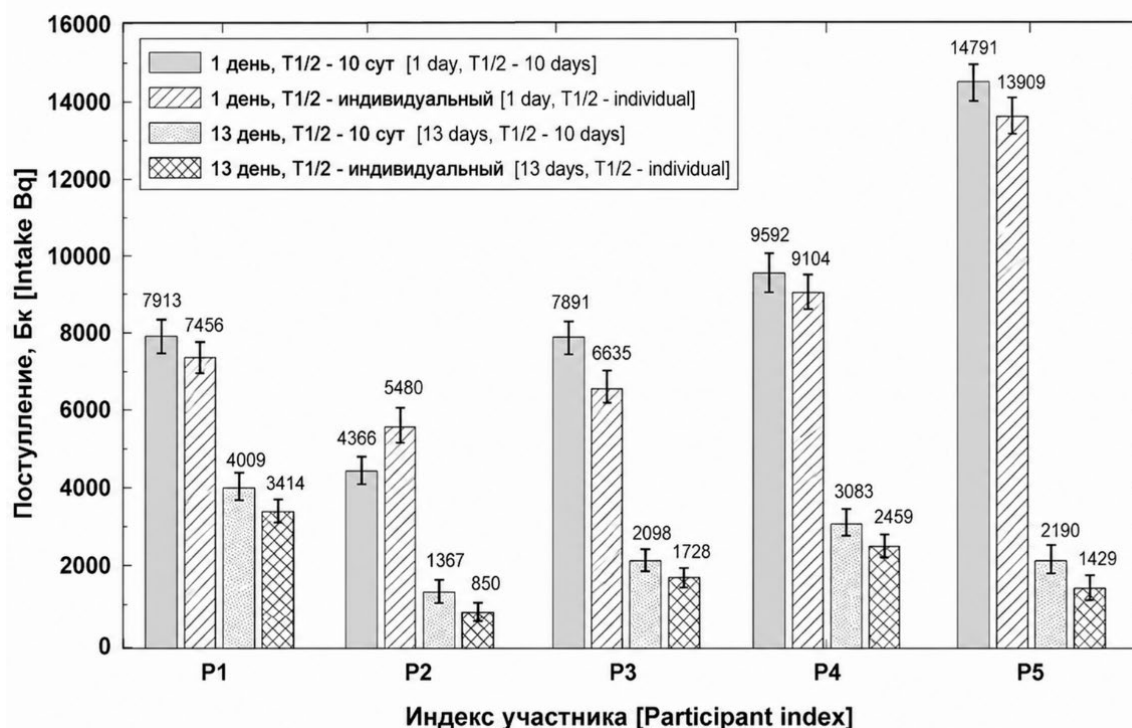


Рис. 6. Уровни поступления НТО с учетом и без учета периодов полувыведения трития у участников исследования
[Fig. 6. HTO intake levels with and without tritium half-lives in the study participants]

Из рисунка 6 видно, что при использовании новой модели МКРЗ без учета периода полувыведения уровни поступления трития для участников P2 и P5 за второй эпизод пребывания были ниже примерно в 1,5 раза.

Оценка уровней поступления трития по результатам оценки концентрации трития в воздухе

Для расчета поступления использовались средние зна-

чения объемной активности трития в воздухе и доли времени пребывания участников исследования в каждом помещении, приведенные в таблице 8. Результаты расчета средневзвешенных по времени пребывания значений объемной активности трития и поступления трития каждому участнику за 6 часов в дни пребывания приведены в таблице 9. Объем дыхания принят для мужчин и женщин на основе величин, приведенных в публикации МКРЗ 89 для сидячей работы: 0,54 и 0,39 м³/час для мужчин и женщин соответственно.

Таблица 9. Уровни поступления трития участникам исследования по объемной активности трития в рабочих помещениях
[Table 9. Tritium intake levels by tritium volumetric activity in the work rooms]

Номер помещения [Room number]	Объемная актив- ность, Бк/м ³ [Volumetric activity, Bq/m ³]	Индекс участников исследований [Participants ID]				
		P1	P2	P3	P4	P5
	1-й день [first day]	Доля времени пребывания в помещении [Fraction of time spent in the room]				
Помещение 1 [Room 1]	3486 ± 1806	0,1	0,1	0,1	0,4	0,6
Помещение 2 [Room 2]	1495 ± 390	0,1	0,1	0,4	0,3	0,2
Помещение 3 [Room 3]	1851 ± 612	0,8	0,8	0,5	0,3	0,2
Результаты расчета [Calculation results]						
Среднее значение объемной активности, Бк/м ³ [Mean value of volumetric activity, Bq/m ³]		1947	1942	1965	2312	2711
Объем вдыхания, м ³ /час [Inhalation rate, m ³ /hour]		0,54	0,39	0,39	0,54	0,54
Поступление за 6 часов, Бк [Intake over 6 hours, Bq]		6307 ±2263	4544 ±1631	4598 ±1616	7492 ±3115	8784 ±4118
Номер помещения [Room number]	13-й день [13-th day]	Доля времени пребывания в помещении [Fraction of time spent in the room]				
Помещение 1 [Room 1]	718±12	0,1	0	0,1	0,3	0,5
Помещение 2 [Room 2]	544±96	0,1	0,6	0,3	0,3	0,3
Помещение 3 [Room 3]	814±137	0,8	0,4	0,6	0,4	0,2
Результаты расчета [Calculation results]						
Среднее значение объемной активности, Бк/м ³ [Mean value of volumetric activity, Bq/m ³]		823	661	668	711	742
Объем вдыхания, м ³ /час [Inhalation rate, m ³ /hour]		0,54	0,39	0,39	0,54	0,54
Поступление за 6 часов, Бк [Intake over 6 hours, Bq]		2668 ±415	1547 ±263	1563 ±253	2303 ±289	2406 ±218

Сопоставление уровней поступления трития, полученных на основании результатов измерений удельной активности трития в пробах мочи и объемной активности в воздухе представлено на рисунке 7.

Из рисунка видно, что все оценки уровней поступления, выполненные по результатам расчетов объемной активности в воздухе (Air), меньше оценок, выполненных по скорости выведения трития с мочой (Ur-134, Ur-56) или по содержанию в теле (Wb-134, Wb-56), оцененному по концентрации трития в моче. Одной из причин расхождений в оценках может быть величина принятых для расчетов объемов дыхания, значения которых для сидячей работы составляли 0,54 м³/час для мужчин и 0,39 м³/час для женщин, однако при объемах дыхания для легкой работы (1,5 и 1,3 для мужчин и женщин соответственно) уровни становятся выше оцененных по моче. Таким образом, концентрация НТО в воздухе рабочих помещений позволяет дать лишь оценочное суждение об уровнях поступления НТО.

Заключение

1. При оценке уровней ингаляционного поступления водных форм трития по результатам измерений

его содержания в моче новая модель МКРЗ, предложенная в 134 Публикации, дает оценки, сопоставимые с результатами, полученными по модели МКРЗ из 56 Публикации, однако в первые двое суток с момента пролонгированного поступления трития новая модель МКРЗ более точно отражает динамику его содержания и выведения.

2. Для более точной оценки поступления трития по результатам измерений содержания трития в моче, отобранной через неделю и более, требуется коррекция модели по периоду полувыведения трития, которую проще выполнить по модели 56 публикации МКРЗ.

3. Точность оценки ингаляционного поступления трития по результатам измерений объемной активности в воздухе зависит от выбора объема дыхания. Значения 0,54 и 0,39 м³/час, принятые для мужчин и женщин для сидячей работы в рамках настоящего исследования, дали заниженные оценки поступления по сравнению с оценками, выполненными по моче. При объемах дыхания для легкой работы (1,5 и 1,3 м³/час для мужчин и женщин соответственно) уровни становятся выше оцененных по моче.

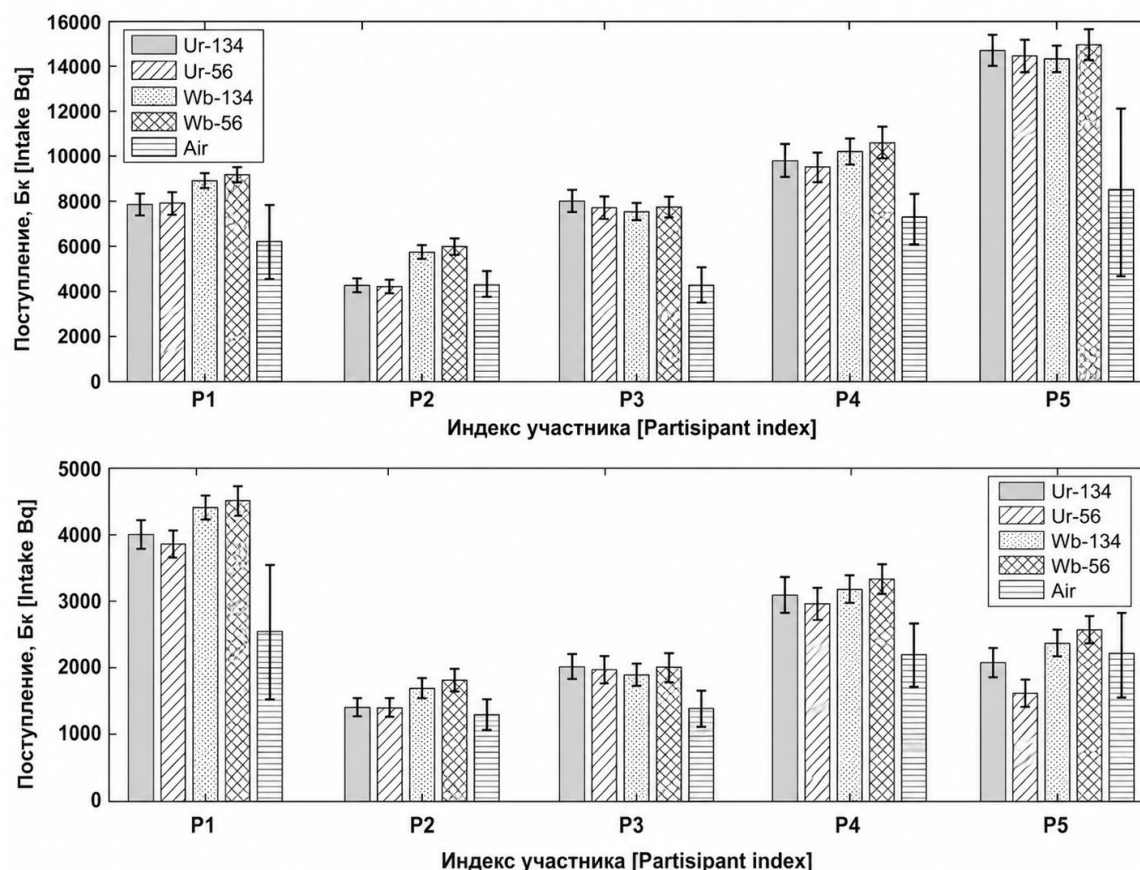


Рис. 7. Уровни ингаляционного поступления трития в 1-й день (сверху) и на 13-й день (внизу) по содержанию НТО в моче с использованием моделей 56 и 134 публикаций МКРЗ и по объемной активности НТО в воздухе. Обозначения на рисунке аналогичны обозначениям в таблице 8

[Fig. 7. First-day (left) and 13th-day (right) tritium inhalation levels based on urinary HTO content using ICRP publication models 56 and 134 and based on air HTO volumetric activity. The designations in the figure are similar to those in Table 8]

4. Несмотря на то, что оценки уровней поступления, выполненные по скорости выведения с мочой и по содержанию в теле оказались близкими, оценки по содержанию в теле представляются более надежными, чем по скорости выведения с мочой, поскольку не зависят от суточного диуреза.

5. Результаты валидации новой модели МКРЗ по тритию показали, что новая модель имеет преимущества перед старой только при интерпретации результатов измерения концентрации в моче, полученных в первые 12 часов от начала поступления, что чрезвычайно важно при контроле аварийного поступления.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Репин В.С. осуществлял общее руководство выполнения научного исследования; разработал устройство и метод отбора проб трития из воздуха посредством вымораживания воздушной влаги на элементе Пельтье; определил план проведения исследования; определил план написания статьи, цели и задачи; принял участие в экспериментальной части исследования; провел анализ литературных данных, подготовил графики и таблицы, написал черновик и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнале.

Варфоломеева К.В. приняла участие в экспериментальной части исследования, провела поиск и анализ литератур-

ных данных, отредактировала промежуточный и окончательный вариант рукописи.

Зеленцова С.А. приняла участие в экспериментальной части исследования; провела поиск и анализ литературных данных, отредактировала промежуточный и окончательный вариант рукописи.

Седнев К.А. принял участие в экспериментальной части исследования; принял участие в отборе проб конденсата в воздухе рабочих помещений; выполнил подготовку счетных образцов и измерения содержания трития, провел поиск и анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Разин К.А. принял участие в экспериментальной части исследования; принял участие в отборе проб конденсата в воздухе рабочих помещений; провел поиск и анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовке данной статьи.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки и выполнено в рамках инициативной НИР.

Литература

1. Балонов М.И. Дозиметрия и нормирование трития. М.: Энергоатомиздат, 1983. 152 с.
2. 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-16-25.
3. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 1. ICRP Publication 56 // Annals of the ICRP. 1990. Vol. 20, No. 2.
4. International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66 // Annals of the ICRP. 1994. Vol. 24, No 1-3.
5. International Commission on Radiological Protection. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134 // Annals of the ICRP. 2016. Vol. 45, No. 3/4. P. 1-352.
6. World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). Geneva: WMO, 2008.
7. CarnotCycle. How to Convert Relative Humidity to Absolute Humidity. 2012. URL: <https://carnotcycle.wordpress.com/2012/08/04/how-to-convert-relative-humidity-to-absolute-humidity/> (Дата обращения: 13.05.2026).
8. International Commission on Radiological Protection. Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 100 // Annals of the ICRP. 2006. Vol. 36, No. 1-2.
9. Основные анатомические и физиологические данные для использования в радиационной безопасности [референтные значения], публикация МКРЗ 89 / под ред. проф. И.Б. Кеирим-Маркуса; пер. с англ. Т.Д. Кузьминой. М.: Медкнига, 2007. 318 с.

Поступила: 02.07.2026

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. Е-mail: v.repin@mail.ru; ORCID: 0009-0005-9897-0930; РИНЦ Author ID: 649799

Варфоломеева Ксения Владимировна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0008-3483-806X; РИНЦ Author ID: 654759

Зеленцова Светлана Александровна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0005-2244-0028; РИНЦ Author ID: 700456

Седнев Константин Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0006-7906-1106; РИНЦ Author ID: 1245560

Разин Кирилл Александрович – исполняющий обязанности младшего научного сотрудника лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Репин В.С., Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Разин К.А. Валидация новой модели МКРЗ при ингаляционном поступлении водной формы трития // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 3. С. 7-20. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-3-7-20

Validation of the new ICRP model for inhalation intake of tritium in the form of tritiated water

Viktor S. Repin, Kseniya V. Varfolomeeva, Svetlana A. Zelentsova, Konstantin A. Sednev, Kirill A. Razin

Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Publication 134 of the International Commission on Radiological Protection introduces an updated biokinetic model for internal exposure to tritium, which highlights the need to transition to individualized dose assessment based on this model in dosimetric monitoring. The aim of the study was to validate ICRP Publication 134 for estimating inhalation intakes of tritium based on measurements of tritium activity concentration in urine and tritiated water concentration in workplace air. Materials and Methods. Five participants were involved in the study and stayed twice in a tritium work area at a 13-day interval; each stay lasted 6 h. The air temperature and humidity were measured, air condensate samples were collected using a Peltier element, and urine samples were obtained. Urine sampling continued on subsequent days after the exposure. The model validation was performed by comparing model-derived estimates with experimental values of tritium activity concentration in urine and condensate samples under identical HTO intake scenarios. Results and Discussion. The ICRP Publication 134 model provides estimates of HTO inhalation intake

Viktor S. Repin

Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: 8, Mira Str., Saint Petersburg, 197198, Russia; E-mail: v.repin@niir.ru

comparable to those obtained with the ICRP Publication 56 model; however, within the first 12 h after prolonged tritium intake, Publication 134 more accurately reflects the dynamics of uptake and elimination. For more accurate assessment of tritium intake based on urine samples collected one week or later after exposure, correction for the tritium effective half-life is required. It is easier to perform the correction using the Publication 56 model. The breathing rates assumed in the study for sedentary work (0.54 and 0.39 m³/h for men and women, respectively) led to underestimation of intake compared with estimates based on urine data, whereas breathing rates corresponding to light work resulted in intake estimates exceeding those derived from urine measurements. Conclusion: The validation results for the new ICRP tritium model showed that the new model has advantages over the old one only when interpreting urine concentration measurement results obtained in the first 12 hours after the onset of intake, which is extremely important for monitoring accidental intake.

Key words: tritium, biokinetic model, ICRP, monitoring, urine, air.

Authors' personal contribution

Repin V.S. supervised the study; developed a device for tritium air sampling using the freeze-out method with a Peltier element; defined the research design; formulated the aims and objectives of the manuscript; participated in the experimental work; performed the literature review and data analysis; prepared the figures and tables; drafted the manuscript; and submitted the final version for publication.

Varfolomeeva K.V. participated in the experimental work, conducted the literature search and analysis, and edited the intermediate and final versions of the manuscript.

Zelentsova S.A. participated in the experimental work, conducted the literature search and analysis, and edited the intermediate and final versions of the manuscript.

Sednev K.A. participated in the experimental work; participated in air condensate sampling in the workplace; conducted the literature search and analysis; and edited the intermediate version of the manuscript.

Razin K.A. participated in the experimental work; participated in air condensate sampling in the workplace; conducted the literature search and analysis; and edited the intermediate version of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest in conducting the work and preparing this article.

Sources of funding

This study received no external funding.

References

1. Balonov M.I. Dosimetry and Tritium Regulation. Moscow: Energoatomizdat; 1983. 152 p.
2. Balonov M.I., Chipiga L.A. Dose assessment from intake of tritium oxide into the human body: the role of tritium incorporation into tissue organic matter. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 16–25. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-16-25.
3. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 1. ICRP Publication 56. *Annals of the ICRP*. 1990;20(2).
4. International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. *Annals of the ICRP*. 1994;24(1–3).
5. International Commission on Radiological Protection. Occupational intakes of radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. *Annals of the ICRP*. 2016;45(3/4): 1–352.
6. World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). Geneva: WMO; 2008.
7. CarnotCycle. How to Convert Relative Humidity to Absolute Humidity [Electronic resource]. 2012. Available from: <https://carnotcycle.wordpress.com/2012/08/04/how-to-convert-relative-humidity-to-absolute-humidity/> (Accessed: 13.05.2026).
8. International Commission on Radiological Protection. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. *Annals of the ICRP*. 2006;36(1–2).
9. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection [Reference Values]. ICRP Publication 89 / ed. by Prof. I.B. Keirim-Markus; transl. from English by T.D. Kuzmina. Moscow: Medkniga; 2007. 318 p.

Received: July 02, 2026

For correspondence: Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197198, Russia; E-mail: v.repin@niirg.ru); ORCID: 0009-0005-9897-0930; RSCI Author ID: 649799

Kseniya V. Varfolomeeva – Research Fellow, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0008-3483-806X; RSCI Author ID: 654759

Svetlana A. Zelentsova – Research Fellow, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0005-2244-0028; RSCI Author ID: 700456

Konstantin A. Sednev – Junior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0006-7906-1106 RSCI Author ID: 1245560

Kirill A. Razin – Acting Junior Research Fellow of the Ecology Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia.

For citation: Repin V.S., Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Razin K.A. Validation of the new ICRP model for inhalation intake of Tritium in the form of tritiated water. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 3. P. 7–20. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-3-7-20