

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ эпидемиологических данных по ВИЧ-инфекции на современном этапе / Е. И. Краснова [и др.] // Journal of Siberian Medical Sciences. – 2018. – № 1. – С. 84-95.
2. Мархоцкий, Я. Л. Профилактика ВИЧ-инфекции: учебное пособие для вузов / Я. Л. Мархоцкий. – 3-е изд., испр. и доп. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 128 с.

ОЦЕНКА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ КОРНЕВОМ ПОГЛОЩЕНИИ ОКИСИ ТРИТИЯ ОВОЩНЫМИ КУЛЬТУРАМИ A SSESMENT OF RADIOECOLOGICAL RISKS IN CASE OF CONTAMINATION OF CROPS AS A RESULT OF SHORT-TERM RELEASE OF TRITIUM OXIDE

**Е. Н. Поливкина¹, Е. С. Сысоева¹, Е. В. Романенко¹, А. В. Паницкий¹
Ye. N. Polivkina¹, Ye. S. Syssoyeva¹, Ye. V. Romanenko¹, A. V. Panitskiy¹**

*Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК,
г. Курчатова, Республика Казахстан
polivkina@nnc.kz
Branch of the Institute of Radiation Safety and Ecology of the National Nuclear Center
the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan*

Проведена серия экспериментов для оценки накопления трития овощными культурами перца, огурца и фасоли при хроническом поглощении окиси трития в условиях гидропоники. Установлено, что овощные культуры различаются по способности к аккумуляции трития в органическом веществе. Минимальная способность к накоплению органически связанной формы изотопа отмечена для плодов огурца, максимальная – для фасоли, что, очевидно, обусловлено физиологическими особенностями растений. Значения вклада неорганической и органической формы трития в дозу внутреннего облучения в результате употребления растениеводческой продукции, полученной при хроническом корневом поглощении тритированной воды, пренебрежимо малы даже при 3-кратном превышении уровня вмешательства трития в источнике и зависят от морфофизиологических особенностей растений, а также годового потребления овощей.

A series of experiments was conducted to assess tritium accumulation by allotment crops such as pepper, cucumber and haricot on the chronic uptake of tritium oxide under hydroponic conditions. Allotment crops were found to differ in the ability to accumulate tritium in the organic matter. The poorest accumulation ability of the organically bound form of the isotope is noted for cucumber fruits, the best – for haricot, which is evidently attributed to physiological plant features. Values of the contribution by the tritium organic and inorganic forms to the internal dose delivered due to the chronic root uptake of tritiated water from the consumption of crop products are negligible even with a 3-fold excess of the tritium intervention level in the source and depend on morphophysiological plant features as well as the annual intake of vegetables.

Ключевые слова: окись трития, тритий свободной воды тканей, органически связанный тритий, овощные культуры, гидропоника, корневое поглощение, доза внутреннего облучения.

Keywords: tritium oxide, tritium of free tissue water, organically bound tritium, vegetable crops, hydroponics, root absorption, internal radiation dose.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-1-49-52>

Введение. Тритий – радиоактивный изотоп водорода (Т или ^3H), участвующий в глобальном водородном цикле, а также во всех метаболических процессах. Атомы трития могут замещать атомы водорода в молекулах воды с образованием тритиевой воды (НТО), в органических молекулах с образованием органически связанного трития (ОВТ). Органически связанный тритий является одним из важнейших неизвестных в отношении круговорота трития в окружающей среде, а также воздействия на здоровье человека [1]. Если говорить о влиянии трития на человека при вдыхании или непосредственном воздействии на кожу, так как бета-излучение изотопа не может проникать через дерму или эпидермис (6 мкм по сравнению с толщиной дермы 20-100 мкм и толщиной эпидермиса 1-3 мм). Однако, тритий оказывает длительное воздействие, когда включается в органическое вещество биологической системы, в том числе и человеческого организма [2]. Так, биологический период полураспада НТО у взрослых составляет примерно 10 дней, органически связанный тритий будет оставаться в организме примерно до 40 дней, и некоторое количество органически связанной формы изотопа может оставаться в жировых и коллагеновых тканях даже около 450 дней [2]. В последние десятилетия возрос интерес к вкладу ОВТ в дозу при при-

еме внутрь. Многие из того, что известно о воздействии трития на здоровье человека, основано на исследованиях с использованием животных и методов исследования свободных клеток *in vitro* [1-3]. Эксперименты с кроликами показали, что поглощенная доза радиации была выше в группе, подвергшейся воздействию тритированной пищи, чем в группе, подвергшейся прямому воздействию НТО и расчет поглощенной дозы только на основе трития в воде организма приводит к занижению фактических доз. Результаты оценки дозы облучения при хроническом воздействии тритиевых органических соединений на крыс показали, что вклад органически связанной формы изотопа в общую мощность дозы в тканях был выше, чем после воздействия тритированной воды. Исследования с введением D-меченой глюкозы, аланина, пальмитиновой кислоты или сои в организм многих добровольцев показали, что органически связанный в проглоченных ингредиентах дает более высокие дозы, чем ожидаемые [1-3]. В связи с этим, оценка возможного вклада органически связанных форм трития в составе пищевых продуктов в дозу внутреннего облучения населения сегодня вызывает серьезную озабоченность.

Существующие исследования в основном сосредоточены на поглощении трития овощными культурами при рутинных выбросах НТО и НТ атмосферу [1]. При этом, корневая система, как основной поставщик воды и питательных веществ, для растений будет важнейшим источником НТО в условиях тритиевого загрязнения почвы и воды, что неизбежно при крупных авариях. Каковы риски от употребления растениеводческой продукции в случае пролонгированного воздействия трития в результате тритиевого загрязнения воды для орошения или почвы агроэкосистем пока недостаточно изучены. В данной работе представлены результаты консервативной оценки возможного вклада трития в дозу внутреннего облучения человека при употреблении овощных культур (перец, огурец, фасоль), подвергшихся хроническому загрязнению тритием посредством корневого поглощения в модельном эксперименте.

Материалы и методы. В качестве экспериментальных растений выбраны культуры перца (*Capsicum annuum*), огурца (*Cucumis sativus*) и фасоли (*Phaseolus vulgaris*), культивируемые повсеместно в Республике Казахстан и за его пределами. Кроме того, данные культуры принадлежат к разным семействам, а также имеют плоды, характеризующиеся различным содержанием воды, сахаров, белков и т.д., что с точки зрения аккумуляции ОСТ представляет немаловажное значение.

Пророщенные семена высаживали на гидропонные установки. Минеральное питание растений поддерживали на оптимальном уровне с использованием комплексных удобрений. В гидропонных установках в качестве основы для питательного раствора использовали воду с активностью трития в форме окиси (НТО) 56 кБк/л. Воду для проведения эксперимента отбирали в местах проведения подземных ядерных испытаний из самоизливающейся гидрогеологической скважины. Длительность экспозиции растений составляла полный вегетационный цикл, который в среднем для культуры перца составил – 100-120, для огурца – 45-50, для фасоли – 45-50 суток. Световой поток необходимый для нормальной жизнедеятельности обеспечивали системой искусственного фито-освещения (10 000 Лк). В ходе экспериментов фиксировали температуру и относительную влажность с использованием термогигрометра «ИВА-6» (Россия), освещенность измеряли с помощью люксметра и пересчитывали в мкмоль/с/м².

Отбор проб растений проводили на стадии созревания по органам в 3-4-кратной повторности. Для контроля содержания НТО в воздухе лабораторного помещения периодически пробы воздуха с использованием тритиевого коллектора «OS 1700» (АМТЕК, США).

Удельную активность трития в образцах измеряли методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии с использованием спектрометра «QUANTULUS 1220» (Perkin Elmer, США). Минимально-детектируемая активность трития при измерении на «QUANTULUS 1220» составила – 0,7 Бк/л.

Возможный вклад в дозу внутреннего облучения от перорального поступления трития в форме НТО и ОСТ при употреблении 1 кг загрязненных овощей, рассчитывали исходя из усредненной удельной активности радионуклида в плодах по формуле:

$$E_{ingi} = A_i \times e_{ingi}. \quad (1)$$

где A_i – удельная активность i -го радионуклида в продуктах питания, Бк/кг;

e_{ingi} – дозовый коэффициент i -го радионуклида при поступлении его через пищеварительный тракт (№ КР ДСМ-71 от 02.08.22). Так как в данном исследовании рассматривался только радионуклид тритий, но в двух разных формах возможного поступления, при расчете в качестве A_{mi} принимали удельную активность форм трития (НТО и ОСТ) в съедобных органах.

Годовое поступление искусственных радионуклидов определяли по содержанию радионуклидов в овощах рациона и величине годового потребления этих продуктов:

$$E_{ingi} = A_i \times V_p. \quad (2)$$

где V_p – годовое потребление пищевого продукта (р) питания, кг/год.

В качестве V_p использовали рациональные среднелюдовые нормы потребления овощей (Приказ Министра национальной экономики Республики Казахстан от 9 декабря 2016 года № 503 «Рациональные среднелюдовые нормы потребления продуктов питания»).

Результаты и обсуждение. В таблице 1 представлены результаты измерения удельной активности трития в форме НТО в питательном растворе гидропонных установок, на которых выращивались овощные культуры.

Таблица 1

Удельная активность ^3H в питательном растворе

Питательный раствор	n	Удельная активность ^3H , Бк/л			V, %
		Ср.геометр.	Медиана	Ст.откл.	
Перец (<i>Capsicum annuum</i>)	101	25091	25700	2789	11
Огурец (<i>Cucumis sativus</i>)	38	25189	25200	643	3
Фасоль (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	12	24913	24800	453	2

Согласно данным таблицы 1, удельная активность трития в питательном растворе гидропонных установок превышала уровень вмешательства (7600 Бк/л) в среднем в 3 раза.

Удельная активность трития в продовольственной части экспериментальных овощных культур, выращенных в условиях искусственно созданного хронического тритиевого загрязнения, представлена в таблице 2. Как видно из таблицы 2, характер распределения трития в свободной воде органов трех культур на стадии созревания не имел четкой закономерности. Так, в перце и огурце максимальная активность ТСВ наблюдалась в стеблях, минимальные – в листьях и плодах, а в органах фасоли имела практически одинаковые значения. Для концентрации органически связанной формы трития отмечено равномерное распределение по органам во всех трех культурах.

Таблица 2

Удельная активность ^3H в свободной воде и органическом веществе экспериментальных культур

Культура	Форма изотопа	Удельная активность ^3H , Бк/л						Ст. откл.	V, %
		Орган	n	Ср. геометр.	Медиана	Минимум	Максимум		
Перец (<i>Capsicum annuum</i>)	ТСВ	лист	21	17750	17000	13000	23000	3369	19
		стеб	21	23653	24000	16000	26000	2542	11
		плод	30	19982	20000	16000	23000	1818	9
	ОСТ	лист	21	2571	2700	1700	3400	450	17
		стеб	21	2831	2950	1800	3300	391	14
		плод	30	2542	2900	1200	3400	708	27
Огурец (<i>Cucumis sativus</i>)	ТСВ	лист	21	17442	18000	12000	21000	2745	16
		стеб	20	22129	22000	20000	24000	988	4
		плод	34	14500	17000	11000	21000	2460	15
	ОСТ	лист	11	3368	3300	2700	4000	413	12
		стеб	9	3120	3300	1700	4300	893	28
		плод	28	3600	3200	1900	4400	715	23
Фасоль (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	ТСВ	лист	14	26048	26000	24000	28000	1141	4
		стеб	14	25174	26000	16000	36000	4146	16
		плод	9	25418	25000	24000	28000	1236	5
	ОСТ	лист	14	5908	5950	5000	7300	521	9
		стеб	14	6632	6750	5000	7200	561	8
		плод	9	6563	6600	6200	6900	245	4

Согласно полученным результатам, удельная активность трития превысила уровень вмешательства только в свободной воде тканей растений в среднем в 3 раза. Значения удельной активности органически связанной формы изотопа уровень вмешательства не превышали и были ниже от 1 до 2 раз.

Для сравнительной оценки способности культур к аккумуляции неорганической и органической форм трития в плодах рассчитаны относительные концентрации изотопа (Таблица 3).

Таблица 3

Относительное содержание форм ^3H продовольственной части овощных культур

Культура	Относительная концентрация ТСВ	Относительная концентрация ОСТ
Перец сладкий (<i>Capsicum annuum</i>)	0,8	0,1
Огурец (<i>Cucumis sativus</i>)	0,6	0,2
Фасоль (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1,0	0,3

Как видно из таблицы 3, относительное содержание ТСВ в результате хронического поглощения НТО указывает на установившееся равновесие между удельной активностью трития в питательном растворе и свободной

воде тканей. Однако, овощные культуры различаются по способности к аккумуляции трития в органическом веществе. Минимальная способность к накоплению органически связанной формы изотопа отмечена для культуры огурца, максимальная – для фасоли, что, очевидно, обусловлено физиологическими особенностями растений. Как известно, органически связанный тритий образуется в основном в процессе фотосинтеза [1] и, соответственно, первичное тритированное органическое вещество представлено тритированными углеводами, которые транслируются в плоды. Так, максимальным содержанием углеводов характеризуются бобы фасоли – 46,6 г на 100 г плодов, на втором месте – плоды перца (5,3 г), и наименьшее количество в плодах огурца (2,6 г). Таким образом, различная способность к аккумуляции органически связанного трития в плодах вполне объяснима. Во-первых, с точки зрения биохимического происхождения, ОСТ в растениях тесно связан с углеводной фракцией, которая запасается в плодах. Во-вторых, морфофизиологическими особенностями самих растений, которые обуславливают структуру плодов. В данном аспекте, показателем может быть содержание сухого вещества в плодах: в бобах фасоли – 86, в плодах перца – 9, а в плодах огурца – 5%.

Как известно [2], неорганическая и органическая формы трития имеют различные дозовые коэффициенты, а значит и факторы риска. Дозовый коэффициент для трития, поступившего с пищей в виде неорганических соединений (НТО в составе свободной воды тканей) составляет $4,8 \times 10^{-11}$ Зв/Бк, а для трития, поступившего с пищей в виде органических соединений (ОСТ) – $1,2 \times 10^{-10}$ Зв/Бк (№ КР ДСМ-71 от 02.08.22). На основании экспериментальных значений удельной активности трития в плодах овощных культур выполнена консервативная оценка возможного вклада в дозу внутреннего облучения человека в случае употребления загрязненной растениеводческой продукции. Результаты расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты консервативной оценки дозы внутреннего облучения от употребления загрязненной растениеводческой продукции

Культура	Доза внутреннего облучения, мкЗв			
	при употреблении 1 кг плодов		за 1 год при среднелюдской норме потребления	
	ТСВ	ОСТ	ТСВ	ОСТ
Перец сладкий (<i>Capsicum annuum</i>)	0,96	0,32	7,71	2,55
Огурец (<i>Cucumis sativus</i>)	0,70	0,43	9,74	6,05
Фасоль (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1,22	0,79	2,93	1,89

Учитывая, что предел годового поступления с пищей ТСВ и ОСТ для населения составляет $2,1 \cdot 10^7$ Бк и $8,3 \cdot 10^6$ Бк в год (№ КР ДСМ-71 от 02.08.22), соответственно, вклад трития в дозу внутреннего облучения с растениеводческой продукцией, полученной при хроническом корневом поглощении тритированной воды, будет пренебрежимо мал даже при 3-кратном превышении уровня вмешательства трития в источнике.

Также необходимо отметить, что при употреблении 1 кг загрязненной тритием растениеводческой продукции максимальный вклад в дозу внутреннего облучения человека будет от плодов с более высоким содержанием углеводов и сухого вещества. При этом риски от годового потребления загрязненных овощей в большей степени будут зависеть от среднелюдской нормы потребления продукции.

Заключение. Таким образом, вклад техногенного трития в дозу внутреннего облучения населения с растениеводческой продукцией, загрязненной в результате корневого хронического поглощения НТО, будет определяться одновременно несколькими факторами: уровнем удельной активности в источнике поступления, морфофизиологическими особенностями сельскохозяйственных культур, а также нормами потребления овощей.

Данное исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках грантового финансирования (ИРН АР19675034 «Исследование радиоэкологической опасности органически-связанного трития при его накоплении сельскохозяйственными растениями»).

ЛИТЕРАТУРА

- Boyer, C. Tritium in plants: a review of current knowledge / C. Boyer, L. Vichot, M. Fromm, Y. Losset, P. Guetat, P. M. Badot // *Environmental and Experimental Botany*. – 2009. – V. 67, № 1. – P. 34–51
- Балонов, М.И. Оценка дозы от поступления окиси трития в организм человека: роль включения трития в органическое вещество тканей / М.И. Балонов, Л.А. Чипига // *Радиационная гигиена*. – 2016. – Т. 9, № 4. – С. 16–25.
- Mihok, S. Tritium dynamics in soils and plants grown under three irrigation regimes at a tritium processing facility in Canada / S. Mihok, M. Wilk, A. Lapp, N. St-Amant, N.-O. A. Kwamena, I. D. Clark // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2016. – V. 153 – P. 176–187.
- Лукашенко, С. Н. Установка для извлечения воды из образцов / С. Н. Лукашенко, Ларионова Н. В., Зарембо В. П. // *Электронный бюллетень [Электронный ресурс]*. – 2015. – № 4. – Режим доступа: <http://kzpatents.com/4-ip29721-ustrojstvo-dlya-izvlecheniya-vody-iz-obrazcov.html>. – Дата доступа: 25.12.2019.
- Международный стандарт ISO 9698:2019. Качество воды. Определение объемной активности трития. Метод подсчета сцинтилляций в жидкой среде. – Введ. 30.04.2019 // *КазИнСт*. – Астана, 2019. – 32 с.