

Таким образом, можно сделать предположение о том, что многие факты многочисленных статистических исследований не в полной мере согласуются с признанными этиологическими причинами распространения рака бронхов и легкого, что актуализирует проведение специальных эпидемиологических исследований для оценки возможностей профилактики данного заболевания.

Возможными причинами наблюдаемых различий, исходя из известных факторов риска, может быть работа в условиях повышенной запыленности у работников сельского хозяйства (полеводов, механизаторов), особенно в сочетании с курением (крепких сортов табака и сигарет без фильтров), воздействие дыма при печном отоплении, а также отсутствие адекватной терапии хронической воспалительной патологии легких в сельской местности.

Инкорпорация длительно живущих радионуклидов с пылью, по аналогии с радоном, также может повышать риск развития рака легкого, особенно у жителей сельской местности на загрязненных радионуклидами территориях. Хотя, по данным канцер-регистра уровни заболеваемости сельского населения Гомельской (наиболее загрязненной радионуклидами) и Витебской (наименее загрязненной) областей статистически значимо не различаются, скорость роста заболеваемости в Гомельской области значительно выше. Факт отсутствия различий в заболеваемости населения, проживающего на территориях с различным уровнем загрязнения радионуклидами, частично может быть обусловлен миграционными процессами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hecht S. Tobacco carcinogens, their biomarkers and tobacco-induced cancer. Nature Reviews. Cancer (Nature Publishing Group) 2003. Vol.3 (10) P. 733 – 744.

ОЦЕНКА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В РЕЗУЛЬТАТЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО ВЫБРОСА ОКСИДА ТРИТИЯ A SSESMENT OF RADIOECOLOGICAL RISKS IN CASE OF CONTAMINATION OF CROPS AS A RESULT OF SHORT-TERM RELEASE OF TRITIUM OXIDE

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

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК
г. Курчатов, Республика Казахстан
syssoeva@nnc.kz

Branch «Institute of Radiation Safety and Ecology» RSE NNC RK
Kurchatov Republic of Kazakhstan

Для оценки накопления трития растениеводческой продукцией в случае кратковременного аварийного выброса оксида трития проведена серия экспериментов с культурой *Lactuca sativa*, *Solanum lycopersicum* и *Phaseolus vulgaris*. Распределение неорганической формы трития в нелистных культурах имело следующий вид: «листья > стебли > плоды». Удельная активность трития в органическом веществе надземных органов на порядок ниже по сравнению с концентрацией неорганической формы. Установлено, что накопление органической формы трития в урожае после выброса зависит от внешних факторов, определяющих фотосинтез. Вклад трития в дозу внутреннего облучения с растениеводческой продукцией, загрязненной в результате кратковременного аварийного выброса оксида трития в большей степени зависит от морфологических особенностей растений, и будет пренебрежимо мал.

To assess the accumulation of tritium by crop products in the event of a short-term emergency release of tritium oxide, a series of experiments with *Lactuca sativa*, *Solanum lycopersicum* and *Phaseolus vulgaris* cultures was conducted. The distribution of the inorganic form of tritium in non-leaf crops had the following form: “leaves > stems > fruits”. The specific activity of tritium in the organic matter of aboveground organs is an order of magnitude lower than the concentration of the inorganic form. It has been established that the accumulation of the organic form of tritium in the crop after release depends on external factors determining photosynthesis. The contribution of tritium to the dose of internal irradiation with crop products contaminated as a result of a short-term emergency release of tritium oxide depends to a greater extent on the morphophysiological characteristics of plants, and will be negligible. The results obtained can be taken into account when predicting tritium concentrations in the plants in case of accidental releases.

Ключевые слова: тритий, НТО, тритий свободной воды тканей, органически-связанный тритий, индекс транслокации, доза внутреннего облучения.

Keywords: tritium, НТО, tissue free water tritium, organically bound tritium, translocation index, internal radiation dose.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-1-35-38>

Введение. Тритий – радиоактивный изотоп водорода, который применяется как важнейший компонент в реакциях термоядерного синтеза, а также в химических, биологических и гидрологических исследованиях. При этом сбросы и выбросы в штатном режиме не представляют значительных рисков для человека и биоты в целом. Основные формы поступления радионуклида во время выбросов – это тритированный водород (HT, T₂) и тритированная вода (НТО, T₂O), но особый интерес для ядерной безопасности представляют именно биодоступные формы, в особенности ОСТ. Данная форма представляет собой связанный с углеродом тритий, который первоначально образовался в живых системах в результате естественных экологических или биологических процессов из тритированной воды (НТО) или тритиевого газа (HT). Таким образом, тритий, поступая в окружающую среду в форме НТО, легко включается в трофическую структуру экосистемы, конечным звеном которой может являться человек [1]. При этом, концентрация ОСТ в сельскохозяйственных культурах является наиболее важным параметром для оценки дозы облучения населения. В ходе ранее проведенных исследований рядом авторов установлено что, вклад ОСТ в дозу внутреннего облучения населения в случае кратковременных аварийных выбросов будет незначительным [2-3]. В данном аспекте значительное внимание уделяется исследованию процессов инкорпорирования трития и его возможного вклада в дозовую нагрузку на человека при поступлении внутрь с растениеводческой продукцией. Таким образом, цель проведенного исследования заключалась в консервативной оценке возможного вклада ОСТ в дозу внутреннего облучения человека при употреблении овощей (салат, томат, фасоль), подвергшихся кратковременному воздействию НТО при аэральном поглощении.

Материалы и методы исследования. В качестве экспериментальных растений выбраны широко культивируемые сельскохозяйственные культуры: салат (*Lactuca sativa*), томат (*Solanum lycopersicum*) и фасоль (*Phaseolus vulgaris*). Растения предварительно выращивали в пластиковых вегетационных сосудах (V=35 л) на фоновой светлокаштановой суглинистой почве до стадии созревания. Согласно литературным данным [2], концентрация ОСТ в урожае достигает максимума при воздействии в период активного формирования плода сельскохозяйственных культур. Посев производили сухими семенами, практически не отличающимися по размеру и массе. Полив растений осуществляли бидистиллированной водой, поддерживая оптимальную влажность на уровне 60% от полной влагоемкости почвы.

Экспозицию НТО проводили в местах проведения подземных ядерных испытаний, характеризующихся высокой концентрацией НТО в приземном воздухе [4]. Длительность экспозиции растений составляла 6 часов, для исключения корневого поглощения трития почву в сосудах закрывали полиэтиленовой пленкой.

В течение экспериментов измеряли температуру, относительную влажность, атмосферное давление с использованием термогигрометра «ИВА-6» (Россия). Фотосинтетически активную радиацию (ФАР) измеряли с использованием спектрометра ТЭК (Россия).

Отбор проб растений (листья, стебли, соцветия, плоды) проводили спустя 6 часов экспозиции в трехкратной повторности. Масса каждого растительного образца в среднем составляла 100-150 г. Для предотвращения потери трития пробы растений немедленно упаковывали в zip-пакеты и помещали в морозильную камеру (-20С⁰). Пробы воздуха отбирали с использованием тритиевого коллектора «OS 1700» (АМТЕК, США).

Выделение свободной воды из растительных образцов для измерения активности трития производили посредством специальной установки [5], при этом объем конденсата в среднем составлял 10-15 мл.

После извлечения свободной воды пробы высушивали до постоянной массы и сжигали на установке «Sample Oxidizer» (PerkinElmer, США). Масса сжигаемого образца составляла 1-2 г. В воде, полученной после сжигания сухого растительного образца, измеряли удельную активность ОВТ.

Удельную активность трития измеряли методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии с использованием спектрометра «QUANTULUS 1220» (Perkin Elmer, США). Предварительно перед измерением пробы фильтровали для удаления механических примесей, затем отбирали аликвоту объемом 3 мл в пластиковую вials объемом 20 мл и добавляли сцинтилляционный коктейль Ultima Gold LLT для природных образцов (эффективность регистрации для трития в диапазоне 0-18 КэВ порядка 60%) в пропорции 1:4 (отношение «образец-сцинтиллятор»). Время измерения составляло не менее 120 минут, обработку бета-спектров и расчёт удельной активности трития проводили с использованием программы «Quanta Smart». Минимально-детектируемая активность трития составила – 0,7 Бк/л.

Объемную активность трития в каждой пробе воздуха определяли как среднее арифметическое из результатов измерений 3 счетных образцов, подготовленных из исходной пробы.

Транслокацию органических производных трития (TLI - translocation index) в съедобную часть растений оценивали по формуле [3]:

$$TLI = (C_{\text{ОСТ-плод}}/C_{\text{ТСВ-лист}}) 100\%. \quad (1)$$

где С_{ост} – удельная активность ОСТ в плодах, Бк/л; С_{тсв} – удельная активность ТСВ в листьях.

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:

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

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:

$$E_{ingi} = A_i \times V_p \quad (3)$$

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

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

Результаты и обсуждение. Значения параметров окружающей среды во время экспозиции исследуемых культур представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения факторов окружающей среды во время экспозиции растений

Культура	φ , %	t, C°	PPDF, мкмоль/с/м ²	Удельная активность трития в воздухе, Бк/л
<i>Lactuca sativa</i> (2021)	56	21	870	1234,2
<i>Lactuca sativa</i> (2020)	28	35	1485	4071,4
<i>Solanum lycopersicum</i>	56	21	870	1234,2
<i>Phaseolus vulgaris</i>	56	21	870	1234,2

Примечание: «–» - данные отсутствуют.

Так, экспозиция растений проводилась при температуре 21-35 C°, относительной влажности воздуха 28-56% и уровне фотосинтетически активной радиации 870-1485 мкмоль/с/м² (таблица 1). Удельная активность трития в воздухе составила 1234-4071 Бк/л.

Концентрация трития в экспериментальных растительных образцах представлена в таблице 1.

Таблица 2

Удельная активность трития в растительных образцах

Культура	Удельная активность трития, Бк/л					
	Листья		Стебли		Плоды	
	ТСВ	ОСТ	ТСВ	ОСТ	ТСВ	ОСТ
<i>Lactuca sativa</i> (2021)	865±130	77±13	–	–	–	–
<i>Lactuca sativa</i> (2020)	2300±333	69±15	–	–	–	–
<i>Solanum lycopersicum</i>	733±77	157±42	80±10	98±30	15±2	56±24
<i>Phaseolus vulgaris</i>	275±30	1452±150	148±20	777±95	210±30	754±94

Примечание: «–» - данные отсутствуют.

Согласно данным таблицы 2, распределение ТСВ для нелистовых культур можно представить в виде следующего убывающего ряда: «листья > стебли > плоды». Максимум ТСВ в листьях, очевидно, обусловлен постоянной диффузией НТО с парами воды в мезофилл листа. Удельная активность ОСТ надземных органах на порядок ниже по сравнению с ТСВ, что обусловлено биохимическим путем образования данной формы радионуклида в растениях [2].

Для оценки способности к аккумуляции трития в продовольственной части растений рассчитаны относительные концентрации форм трития (таблица 3)

Таблица 3

Относительное содержание форм ³H в овощных культурах

Культура	Относительная концентрация ТСВ	Относительная концентрация ОСТ	Индекс транслокации (TLI)
<i>Lactuca sativa</i> (1.)	0,7	0,09	8,9
<i>Lactuca sativa</i> (2)	0,6	0,03	3,0
<i>Solanum lycopersicum</i>	0,01	0,08	7,6
<i>Phaseolus vulgaris</i>	0,2	<п.о.	–

п.о. – предел обнаружения; «–» - данные не получены.

Как видно из таблицы 3, в конце 6-часовой экспозиции только в листьях салата достигнуто равновесие между концентрацией трития в водяных парах приземного воздуха и свободной водой растений, что согласуется с лите-

ратурными данными [2, 3]. В плодах фасоли и томата равновесие не достигалось к концу воздействия, что вполне объяснимо отдаленным расположением данных компартментов относительно листьев, через которые происходит поглощение трития. Таким образом, в случае аварийного выброса окиси трития в атмосферу употребление загрязненных листовых культур будет представлять большую опасность по сравнению с нелистовыми овощами.

Сравнительный анализ значений относительного содержания ОСТ и индекса транслокации показал, что, на накопление изотопа в органической фракции съедобной части культур при аэральном поглощении окиси трития в большей степени влияют внешние факторы, определяющие интенсивность фотосинтеза.

Органически связанная форма трития характеризуется более серьезными факторами риска, по сравнению с НТО [1]. 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 ((№ ҚР ДСМ-71 от 02.08.22)).

В таблице 3 представлены результаты расчета дозы внутреннего облучения от употребления сельскохозяйственной продукции, загрязненной тритием.

Таблица 3

Результаты консервативной оценки дозы внутреннего облучения от употребления загрязненной растениеводческой продукции

Культура	Доза внутреннего облучения при употреблении 1 кг овощей, нЗв		Доза внутреннего облучения за год при среднудшевой норме потребления овощей, нЗв	
	ТСВ	ОСТ	ТСВ	ОСТ
<i>Lepidium sativum</i> (1)	42	6	208	28
<i>Lepidium sativum</i> (2)	110	5	552	25
<i>Solanum lycopersicum</i>	1	7	8	74
<i>Phaseolus vulgaris</i>	6	–	14	–

«–» - данные не получены.

Согласно расчетам, вклад в дозу внутреннего облучения от перорального поступления трития при употреблении 1 кг овощей, загрязненных в результате кратковременного выброса окиси трития, исходя из абсолютной активности форм радионуклида, составит для НТО: салат – 42 и 110 нЗв; томат – 1 нЗв; фасоль – 6 и 14 нЗв соответственно. Для ОСТ: салат – 6 и 5 нЗв; томат – 7 нЗв соответственно. Учитывая, что предел годового поступления с пищей свободного и органически-связанного трития для населения составляет $2,1 \cdot 10^7$ Бк в год и $8,3 \cdot 10^6$ Бк в год соответственно, а среднее потребление данных видов растениеводческой продукции (салат, томат, фасоль) составляет 5, 11 и 2,4 кг в год, возможный вклад трития в дозу внутреннего облучения будет пренебрежимо мал.

Заключение. Таким образом, вклад техногенного трития в дозу внутреннего облучения с растениеводческой продукцией, загрязненной в результате кратковременного аварийного выброса окиси трития в большей степени зависит от морфофизиологических особенностей растений, и будет пренебрежимо мал. Полученные результаты могут учитываться при прогнозировании концентраций трития в продовольственной части растений в случае аварийных выбросов.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках научного гранта №AP19675034.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. – No. 4. No. – С. 16-25. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-16-25.
2. Boyer, C. Tritium in plants: a review of current knowledge / C. Boyer, L. Vichot, M. Fromm, et al. // Environmental and Experimental Botany. – 2009. – V. 67. – No. 1. – P. 34–51.
3. Поливкина, Е.Н. Инкорпорирование трития культурами перца и баклажана при кратковременном воздействии окиси трития / Е.Н. Поливкина, Е.С. Сысоева, Е.В. Романенко, Л.Ф. Субботина, А.В. Паницкий, Ф.Ф. Жамалдинов, Л.Б. Кенжина // Радиационная гигиена. – 2022. – V. 15. – No. 4. – P. 97–105.
4. Lyakhova, O.N. Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk test site / O.N. Lyakhova, S.N. Lukashenko, N. V. Larionova., et al. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2012. – V. 113. – P. 98-107.
5. Лукашенко, С. Н. Инновационный патент РК. № 29721. Установка для извлечения воды из образцов / С. Н. Лукашенко, Н. В. Ларионова, В. П. Зарембо // Электронный бюллетень. Астана, 2015. бюл. No. 4. [Электронный ресурс] URL: <http://kzpatents.com/4-ip29721-ustrojstvo-dlya-izvlecheniya-vody-iz-obrazcov.html> (дата обращения 25.12.2019)