

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

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Растения являются ключевым звеном в процессе миграции трития как в экосистеме в целом, так и в трофической структуре в частности. Значительную часть трития растения в результате фотосинтеза включают в органическое вещество. В данном аспекте исследование процессов инкорпорирования трития и его возможного вклада в дозовую нагрузку на человека при поступлении внутрь с растениеводческой продукцией является актуальной задачей. Цель исследования заключалась в количественной оценке инкорпорирования трития широко культивируемыми культурами перца (*Capsicum annuum*) и баклажана (*Solanum melongena*) при кратковременном воздействии паров окиси трития в лабораторных и натуральных условиях. Для достижения данной цели проведено экспонирование предварительно выращенных в чистых условиях растений на стадии созревания в камере и натуральных условиях бывшего Семипалатинского испытательного полигона. Отбор воздуха производили с помощью коллектора трития «OS 1700». Подготовку растений для измерения органически-связанного трития выполняли с использованием установки «Sample Oxidizer». Активность трития в пробах измеряли на «QUANTULUS 1220». Установлено, что активность трития в свободной воде тканей листьев *Capsicum annuum* и *Solanum melongena* на 1–2 порядка выше, чем в стеблях и плодах. Разница между концентрацией трития в свободной воде тканей и органически связанным тритием во всех вариантах экспозиции составила также 1–2 порядка. Распределение трития в свободной воде тканей обеих культур при кратковременном воздействии окиси трития описывается убывающим рядом: «листья < стебли < плоды». Для органически-связанного трития не установлено четкой закономерности в распределении по органам, что, скорее всего, обусловлено коротким периодом экспозиции растений. К моменту полного созревания плодов наблюдается значительное снижение активности трития в свободной воде тканей (основного источника формирования органически связанного трития в постэкспозиционный период) во всех органах растений. Для органически связанного трития в листьях и стеблях отмечалось как повышение, так и снижение концентрации, а в созревших плодах она осталась практически на том же уровне, как в конце экспозиции. Скорость конверсии трития в органическую форму в натуральных условиях Семипалатинского испытательного полигона выше, чем в камере, в 15–30 раз, а транслокация органически связанного трития в съедобную часть овощных культур — в 2–4 раза, независимо от концентрации окиси трития в воздухе и листьях. Согласно результатам консервативной оценки, возможный вклад в дозу внутреннего облучения от перорального поступления трития при употреблении 1 кг овощей, загрязненных в результате кратковременного воздействия, исходя из абсолютной активности форм радионуклида в плодах *Capsicum annuum* и *Solanum melongena*, составит: для TCB – 0,7 и 5,6 нЗв; для органически связанного трития – 1,7 и 2,4 нЗв соответственно. Так как уровни окиси трития в выбросах предприятий ядерного топливного цикла значительно ниже по сравнению с экспериментальными, возможный вклад трития в дозу внутреннего облучения населения от перорального поступления с растениеводческой продукцией, подвергшейся кратковременному аэральному загрязнению радионуклидом, будет пренебрежимо мал.

Ключевые слова: тритий, окись трития, тритий свободной воды тканей, органически связанный тритий, скорость конверсии, индекс транслокации, вклад в дозовую нагрузку.

Введение

В настоящее время повышенные концентрации трития в окружающей среде, связанные с производством, обращением и утилизацией радиоактивной формы водо-

рода на ядерных объектах, вызывают большую озабоченность общественности, так как не существует эффективных способов для улавливания радионуклида. Тритий со сбросами и выбросами предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ) поступает в водные и наземные экосисте-

Поливкина Елена Николаевна

Институт радиационной безопасности и экологии

Адрес для переписки: 071100, Республика Казахстан, Курчатов, ул. Бейбит-Атом, д. 2; E-mail: polivkina@nnc.kz

мы, а значит, и цепи питания, конечным звеном которых может являться человек [1].

Одна из ключевых ролей в переносе трития принадлежит растениям, которые способны поглощать его аэральным и корневым путями [2–5]. В результате идентичности химических свойств обычной (H_2O) и тритированной (НТО) воды данный радионуклид обладает высокой биодоступностью и легко вовлекается в процессы фотосинтеза, в результате которого инкорпорируется в органическое вещество [2–5]. В органически связанной форме тритий транслоцируется в съедобные части растений [6]. При этом органически связанный тритий (ОСТ), по сравнению с НТО, способен на длительное время задерживаться в составе клеточных структур [2–5]. Кроме того, дозовые коэффициенты для ОСТ примерно в 3 раза выше, чем для НТО [7, 8]. В связи с этим в последние несколько десятилетий значительное внимание уделяется исследованию процессов инкорпориования трития в органическое вещество [2–5] и его возможного вклада в дозовую нагрузку на человека при поступлении внутрь с продуктами питания [9, 10]. В данном аспекте исследование инкорпориования трития растениеводческой продукцией необходимо для оценки радиоэкологических рисков на импактных территориях предприятий ЯТЦ.

Цель исследования – количественная оценка инкорпориования трития овощными культурами перца (*Capsicum annuum*) и баклажана (*Solanum melongena*) при кратковременном воздействии паров НТО.

Задачи исследования

1. Определить количественные параметры инкорпориования трития (скорость конверсии, индекс транслокации) при аэральном поглощении НТО овощными культурами.
2. Дать оценку возможного вклада различных форм трития в дозу за счет потребления растениеводческой продукции, загрязненной в результате кратковременного выброса НТО.

Материалы и методы

Методология модельных экспериментов

В качестве экспериментальных растений выбраны перец (*Capsicum annuum*) и баклажан (*Solanum melongena*), которые культивируются повсеместно.

Сценарий кратковременного аварийного выброса трития для экспозиции растений воспроизводили парами НТО. Имитацию аэрального тритиевого загрязнения в лабораторных условиях проводили в камере, оборудованной системой фитоосвещения. На дно камеры помещали поддон с водой, концентрация НТО в которой составляла $(5,6 \times 10^4)$ Бк/л. Экспозицию НТО в натуральных условиях проводили на бывшей испытательной площадке «Дегелен» вблизи штольни, где проводились подземные ядерные испытания. Данная штольня, несмотря на консервацию портала, характеризуется наличием постоянного радиоактивного водотока с высокой концентрацией НТО как в воде, так и, соответственно, в приземном воздухе в результате эвапорации [11]. Длительность экспозиции растений составляла 6–8 ч. На время экспериментов почву в сосудах закрывали полиэтиленовой пленкой для исключения корневого поглощения трития. Для оцен-

ки концентрации соединений трития в урожае растения после экспозиции помещали в чистые условия в хорошо проветриваемое помещение и выдерживали 14 сут до полного созревания плодов, продолжая полив бидистиллированной водой.

Растения предварительно выращивали до стадии созревания в пластиковых вегетационных сосудах ($V=35$ л) на фоновой светло-каштановой суглинистой почве, в которую перед посевом вносили комплексные удобрения для обеспечения нормального роста и развития растений. Посев производили сухими семенами, схожими по размеру и массе, из расчета 2–3 проростка на 1 сосуд. Полив растений осуществляли бидистиллированной водой, поддерживая оптимальную влажность на уровне 60% от полной влагоемкости почвы.

Отбор проб растений проводили во время экспозиции (с интервалом 2 ч) и спустя 14 сут после экспозиции в трехкратной повторности с разделением на органы (листья, стебли, плоды). Масса каждого растительного образца в среднем составляла 100–150 г. Для предотвращения потери трития пробы растений немедленно упаковывали в зип-пакеты и помещали в морозильную камеру (-20°C). В натуральных условиях использовали портативный холодильник для транспортировки проб. Пробы воздуха отбирали с использованием тритиевого коллектора «OS 1700» (АМТЕК, США).

Контроль параметров

В течение экспериментов измеряли температуру, относительную влажность, атмосферное давление с использованием термогигрометра «ИВА-6» (Россия). Фотосинтетически активную радиацию (ФАР) оценивали путем пересчета Лк в мкмоль/с/м^2 [12].

Лабораторные анализы

Выделение свободной воды из растительных образцов для измерения активности ТСВ производили посредством специальной установки [13], 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). Массу сжигаемого образца составляла 1–2 г. В воде, полученной после сжигания сухого растительного образца, измеряли удельную активность ОСТ.

Удельную активность трития измеряли методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии с использованием спектрометра «QUANTULUS 1220» (Perkin Elmer, США) [14]. Предварительно перед измерением пробы фильтровали для удаления механических примесей, затем отбирали аликвоту объемом 3 мл в пластиковую вialу 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 мин, обработку бета-спектров и расчёт удельной активности трития проводили с использованием программы «Quanta Smart». Минимально-детектируемая активность трития составила 0,7 Бк/кг.

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

Камеральная обработка результатов

Скорость образования ОСТ рассчитывали согласно формуле [15]:

$$v \times C_{\text{TCB}} = (dC_{\text{OCT}}/dt) \times 100\% \quad (1)$$

где C_{OCT} – активность ОСТ в листьях, Бк/кг; C_{TCB} – активность ТСВ в листьях, Бк/кг; t – время наблюдений (экспозиции), ч; v – скорость конверсии трития, % ч⁻¹.

Транслокацию органических производных трития (TLI – translocation index) в съедобную часть растений оценивали по формуле [6]:

$$\text{TLI} = (C_{\text{OCT}} \text{ плод}) / (C_{\text{TC}} \text{ в лист}) \times 100\% \quad (2)$$

где C_{OCT} – удельная активность ОСТ в плодах, Бк/кг; C_{TCB} – удельная активность ТСВ в листьях, Бк/кг.

Результаты и обсуждение

Инкорпорирование трития растениями при кратковременном аэральном воздействии НТО

Для проведения экспозиции выбрана стадия созревания как вариант наихудшего сценария, так как, согласно ранее проведенным исследованиям [16], концентрация ОСТ в урожае достигает максимума, когда растения подвергаются воздействию в период активного формирования плода по сравнению с результатами ближе к сбору урожая или на ранних стадиях развития растений.

Концентрация трития в экспериментальных растительных и воздушных образцах представлена в таблице 1.

Согласно полученным результатам, активность ТСВ в листьях *Capsicum annuum* в камере на порядок превы-

Таблица 1

Удельная активность трития в пробах

[Table 1]

Tritium activity concentration in samples

Период [Period]	Удельная активность трития, Бк/кг [Tritium activity concentration, Bq/kg]						Объемная актив- ность три- тия в возду- хе, Бк/м³(Бк/л) [Tritium volu- metric activity in the air, Bq/m³]
	Листья [Leaves]		Стебли [Stems]		Плоды [Fruits]		
	TCB [TFWT]	OCT [OBT]	TCB [TFWT]	OCT [OBT]	TCB [TFWT]	OCT [OBT]	
Capsicum annuum (камерный эксперимент) [Capsicum annuum (chamber experiment)]							
2 ч [h]	2900±400	20±4,5	163±24	4,9±1,7	152 ±18	27±5	23±2,5
4 ч [h]	5000±800	21±4	450 ±75	4,2±1,7	240±40	17±4	27±2,5
6 ч [h]	8000±1200	47±7	895±130	8,7±2,7	545±80	20±4	55±5,5
14 сут после экспозиции [days after exposure]	333±55	59±7	220±32	37±5	390±45	–	< МДА
Capsicum annuum (полевой эксперимент) [Capsicum annuum (field experiment)]							
2 ч [h]	166±25	7±2,6	16±2,8	6,1±2,5	5±1	< МДА	7±1
4 ч [h]	182±34	22±6	30±6	5±2,6	6±1,1	14±4	11±1,1
6 ч [h]	284±40	17±4	19±3	7±3	14±2,2	11±3,5	21±2
8 ч [h]	235±30	21±5	20±2,2	10±3	9±1,7	9±3	13±1,3
14 сут после экспозиции [days after exposure]	4±3	5±3	< МДА	7±3	12±6	8±4	< МДА
Solanum melongena (камерный эксперимент) [Solanum melongena (chamber experiment)]							
2 ч [h]	1100±200	16±5	84±12	23±5	45±8	8±2,7	29±4,3
4 ч [h]	2400±400	42±9	280±45	19±5	106±15	14±4	66±10,0
6 ч [h]	4600±700	46±8	355±55	9±3	330±50	17±5	86±13,0
14 сут после экспозиции [days after exposure]	245±30	12±3	52±6	9±2	108±20	13±4	<МДА
Solanum melongena (полевой эксперимент) [Solanum melongena (field experiment)]							
4 ч [h]	1400±200	32±7	47±7	5,2±2,5	53±8	10±3	4±0,4
6 ч [h]	1190±140	–	33±4	14±4	60±13	14±4	54±5,5
8 ч [h]	1100±200	–	73±11	–	116±17	20±5	33±3,5
14 сут после экспозиции [days after exposure]	–	–	–	–	45±7	20±8	<МДА

«–» – данные отсутствуют [no data available]; МДА – минимально-детектируемая активность [detection limit]

шала активность ТСВ в натурном эксперименте, тогда как для культуры *Solanum melongena* концентрация отличалась всего от 1,3 до 4 раз, что, вероятно, обусловлено уровнями объемной активности НТО в воздухе при проведении экспозиций. Это подтверждает заметная (по шкале Чеддока) корреляционная зависимость ($r\text{-Spearman} = 0,61$ при $p < 0,05$) между концентрацией трития в воздухе и свободной воде тканей листьев.

Во всех вариантах экспозиции активность ТСВ листьев имела значения на 1–2 порядка выше, чем в других органах (стеблях, плодах), что, очевидно, обусловлено постоянной диффузией НТО с парами воды в мезофилл листа. Также активность ТСВ в большинстве случаев превышала на 1–2 порядка ОСТ, что согласуется с литературными данными [17–20] и объясняется механизмами инкорпорирования трития, среди которых приоритетная роль принадлежит фотосинтезу [2–5]. В целом, распределение радионуклида в свободной воде тканей органов можно представить убывающим рядом «листья < стебли < плоды». Распределение органически связанной формы радионуклида в растениях имело неоднозначный характер, что, вероятнее всего, обусловлено коротким периодом экспозиции, поскольку транспорт тритированных органических ассимилянтов из листьев является более длительным и физиологически зависимым процессом.

Через 14 сут после экспозиции (см. табл. 1) к моменту полного созревания плодов активность ТСВ, являющегося основным источником для формирования ОСТ, снизилась в листьях на 96%, в стеблях – на 87%, а в плодах – на 66%. При этом динамика концентрации ОСТ в листьях и стеблях имела как положительный, так и отрицательный характер, а в созревших плодах осталась практически на том же уровне, что и в конце экспозиции.

На основании полученных данных рассчитана скорость конверсии трития в органически связанную

форму (табл. 2). Согласно результатам камерных экспериментов, конверсия трития в листьях *Solanum melongena* в среднем в 2–3 раза интенсивнее по сравнению с *Capsicum annuum*.

На примере *Capsicum annuum* отмечено, что в натурном эксперименте скорость конверсии трития превышала аналогичные показатели в камере от 15 до 30 раз. При этом необходимо отметить, что во время экспозиции концентрация НТО в камере была в среднем 3,5 раза выше, чем в натурном эксперименте, а активность ТСВ листьев в камере – на порядок выше, чем в полевых условиях (см. табл. 1). Причина различий в скорости конверсии трития, вероятно, заключается в том, что данный процесс в большей степени зависит не от удельной активности ТСВ в ассимиляционной ткани листьев, а от интенсивности протекания фотосинтеза, в ходе которого формируется основная часть ОСТ [2–5].

Следует отметить, что во всех вариантах эксперимента установлен спад конверсии трития в конце экспозиции от 2 до 4 раз. Возможно, наблюдаемая динамика, во-первых, вызвана фотосинтетической депрессией вследствие изменения работы устьичного аппарата. Так, в работе [21] показано, что в середине дня повышение устьичного сопротивления приводит к более чем двукратному снижению интенсивности транспирации, которая, в свою очередь, влияет на скорость фотосинтеза. Экспонирование растений в данной работе проводилось в период с 10–11 ч утра до 16–18 ч вечера. Во-вторых, менее интенсивная конверсия трития в лабораторных условиях может быть обусловлена более низкой концентрацией CO_2 в камере.

Расчитан индекс транслокации, который показывает содержание ОСТ в плодах относительно концентрации ТСВ в листьях (рис.).

Согласно представленным данным, транслокация ОСТ в плоды в натуральных условиях от 2 до 4 раз интенсив-

Скорость конверсии трития в листьях и условия экспозиции

Таблица 2

[Table 2]

Conversion rate of tritium in leaves and exposure conditions]

Время, ч [Period, h]	<i>Capsicum annuum</i>				<i>Solanum melongena</i>			
	Камерный эксперимент [chamber experiment]							
	$\sigma, \% \text{ч}^{-1}$ [$\sigma, \% \text{h}^{-1}$]	$\phi, \%$	t, C°	PPDF, мкмоль/с/м^2 [mmol/s/m^2]	$\sigma, \% \text{ч}^{-1}$ [$\sigma, \% \text{h}^{-1}$]	$\phi, \%$	t, C°	PPDF, мкмоль/с/м^2 [mmol/s/m^2]
2	0,34	91	21	28	0,78	91	23	48
4	0,13	92	25	104	0,44	91	22	50
6	0,1	81	41	435	0,17	89	23	58
Полевой эксперимент [field experiment]								
2	–	80	23	668	2,3	31	23	1259
4	2,1	60	30	345	–	15	42	1020
6	3,0	65	29	220	–	19	33	644
8	1,0	60	24	260	–	31	24	603

«–» – данные отсутствуют [no data available].

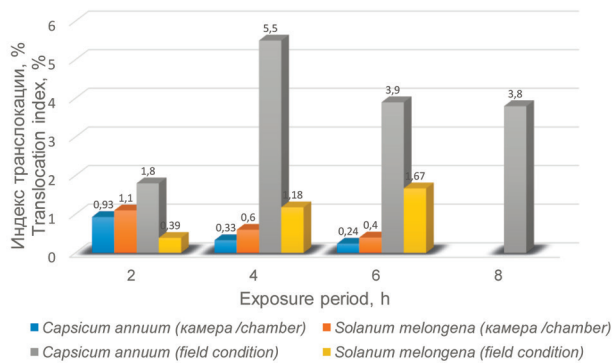


Рис. Индекс транслокации в конце экспозиции, %
[Fig.] Translocation index at the end of exposure, %

нее, чем в лабораторном эксперименте, что указывает на зависимость данного показателя в большей степени от скорости конверсии радионуклида, чем от активности ТСВ в листьях.

Оценка возможного вклада различных форм трития в дозу за счет потребления растениеводческой продукции, загрязненной в результате кратковременного выброса НТО

Органически связанная форма трития характеризуется более серьезными факторами риска, по сравнению с НТО. Во-первых, ОСТ может удерживаться в организме до 40 сут, тогда как период полувыведения НТО составляет около 10 дней (для взрослого человека) [8]. Во-вторых, если дозовый коэффициент для трития, поступившего с пищей в виде неорганических соединений (в нашем случае НТО в составе свободной воды тканей) составляет $4,8 \times 10^{-11}$ Зв/Бк, то для трития, поступившего с пищей в виде органических соединений (ОСТ), – $1,2 \times 10^{-10}$ Зв/Бк [СП 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) утверждены ГГСВ РФ 07.07.09 г.]. Для консервативной оценки использовали данные, полученные в натуральных условиях с максимальными показателями инкорпорирования трития как вариант наихудшего сценария. Согласно расчетам, возможный вклад в дозу внутреннего облучения от перорального поступления трития при употреблении 1 кг овощей, загрязненных в результате кратковременного воздействия, исходя из абсолютной активности форм радионуклида в плодах *Capsicum annuum* и *Solanum melongena*, составит: для ТСВ – 0,7 и 5,6 нЗв; для ОСТ – 1,7 и 2,4 нЗв соответственно. Учитывая, что уровни НТО в выбросах предприятий ЯТЦ [22] на несколько порядков меньше по сравнению с экспериментальными, возможный вклад трития в дозу внутреннего облучения населения от перорального поступления с растениеводческой продукцией, подвергшейся кратковременному аэральному загрязнению радионуклидом, будет пренебрежимо мал.

Заключение

По результатам выполненных исследований дана количественная оценка инкорпорирования трития овощными культурами *Capsicum annuum* и *Solanum melongena* при кратковременном аэральном воздействии НТО в ла-

бораторном и натурном эксперименте. В целом, максимальная активность ТСВ наблюдается в листьях, а для ОСТ четкой закономерности распределения по органам не прослеживается в связи с коротким периодом экспозиции. Относительно органически связанной формы радионуклида концентрация его в свободной воде тканей органов растений выше на 1–2 порядка. Скорость конверсии трития и последующий процесс транслокации ОСТ в съедобную часть *Capsicum annuum* и *Solanum melongena* в натуральных условиях протекают значительно интенсивнее, чем в камере, независимо от концентрации НТО в воздухе и свободной воде листьев. Различия в инкорпорировании трития растениями указывают на зависимость данного процесса от целого комплекса физиологических и абиотических регуляторных механизмов основного биохимического «конвейера» формирования ОСТ – фотосинтеза.

К моменту полного созревания плодов наблюдается значительное снижение активности ТСВ (основного источника формирования ОСТ в постэкспозиционный период) во всех органах растений. Для ОСТ в листьях и стеблях отмечалось как повышение, так и снижение концентрации, а в созревших плодах она осталась практически на том же уровне, как в конце экспозиции.

Консервативная оценка возможного вклада в дозу внутреннего облучения населения при употреблении растениеводческой продукции, загрязненной в результате кратковременного аэального выброса НТО, показала, что он будет пренебрежимо мал. Однако полученные закономерности инкорпорирования трития овощными культурами при кратковременном выбросе НТО могут учитываться при оценке радиоэкологических рисков для сценариев аварийных ситуаций.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Поливкина Е.Н. осуществляла общее руководство проектом, в рамках которого проведена представленная работа, непосредственно являлась организатором и руководителем экспериментальных работ в лабораторных и полевых условиях, провела отбор части проб растений, выполнила анализ литературных данных, анализ полученных результатов, подготовила первоначальный вариант рукописи, оформила окончательный вариант рукописи для публикации в журнале.

Сысоева Е.С. принимала участие в организации и проведении экспериментальных работ в полевых условиях, провела отбор части проб, выполнила анализ литературных данных, провела редактирование промежуточного варианта рукописи.

Романенко Е.В. выполнила бета-спектрометрический анализ проб на содержание ОСТ и НТО, выполнила интерпретацию результатов бета-спектрометрических измерений, оценку вклада форм трития в дозовую нагрузку при пероральном употреблении загрязненной растениеводческой продукции.

Субботина Л.Ф. выполнила подготовку растительных образцов для проведения бета-спектрометрических из-

мерений удельной активности трития в свободной воде тканей и органическом веществе растений.

Паницкий А.В. принимал участие в организации полевых работ, провел редактирование промежуточного варианта рукописи.

Жамалдинов Ф.Ф. осуществлял организацию работ по подготовке и проведению бета-спектрометрического анализа проб на содержание ОСТ и НТО, провел калибровку измерительной аппаратуры, провел редактирование промежуточного варианта рукописи.

Кенжина Л.Б. принимала участие в анализе литературных данных по оценке дозовых нагрузок на население, обусловленных потреблением продуктов, содержащих ОСТ и НТО, провела редактирование промежуточного варианта рукописи.

Благодарность

Авторы благодарят Иванову А.Р., Тимонову Л.В., Абдигамитова Б.Б., Томилова К.Е. (филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан) и Пономареву Т.С. (Товарищество с ограниченной ответственностью «Экоэксперт») за помощь в организации и проведении лабораторных и полевых работ.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы осуществлялось в рамках Бюджетной программы 217 «Развитие науки», подпрограммы 102 «Грантовое финансирование научных исследований» (Проект АП0808956713 «Исследование радиационно-гигиенической опасности техногенного трития при его накоплении растениеводческой продукцией для оценки дозовой нагрузки на население»).

Литература

- Weinberg A.M. The future of nuclear energy // *Physics Today*. 1981. Vol. 34, № 3. P. 48-56.
- Boyer C., Vichot L., Fromm M., et al. Tritium in plants: a review of current knowledge // *Environmental and Experimental Botany*. 2009. Vol. 67, No. 1. P. 34-51. DOI:10.1016/j.envexpbot.2009.06.008.
- Kim S.B., Baglan N., Davis P.A. Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. Vol. 126. P. 83-91. DOI:10.1016/j.jenvrad.2013.07.011.
- Melintescu A., Galeriu D. Uncertainty of current understanding regarding OBT formation in plants // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 167. P. 134-149. DOI:10.1016/j.jenvrad.2016.11.026.
- Erolle F., Ducros L., Séverine L.D., et al. An updated review on tritium in the environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 181. P. 128-137. DOI:10.1016/j.jenvrad.2017.11.001.
- Strack S., Diabat S., Muller J., et al. Organically bound tritium formation and translocation in crop plants, modelling and experimental results // *Fusion Science and Technology*. 1995. Vol. 28, No. 3. P. 951-956. DOI:10.13182/FST95-A30528.
- ICRP Publication 67 (Annals of the ICRP Vol. 23 No. 3/4) Age-dependent doses to members of the public from intakes of radionuclides: Part 2 ingestion dose coefficients international commission on radiological protection. Oxford: Elsevier science; 1993. 167 p.
- 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.
- Hisamatsu S., Takizawa Y. Tritium transfer from diet to human // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1995. Vol. 197, No. 2. P. 271-280. DOI:10.1007/bf02036005.
- Harrison J.D., Khurshed A., Lambert B.E. Uncertainties in dose coefficients for intakes of tritiated water and organically-bound forms of tritium by members of the public // *Radiation Protection Dosimetry*. 2008. No 98. P. 299-311.
- Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Larionova N.V., et al. Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk test site // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012. Vol. 113. P. 98-107. DOI:10.1016/j.jenvrad.2012.02.010.
- Sharakhane A. Whole high-quality light environment for humans and plants // *Life Sciences in Space Research*. 2017. Vol. 15. P. 18-22. DOI:10.1016/j.lssr.2017.07.001.
- Лукашенко С.Н., Ларионова Н.В., Зарембо В.П. Инновационный патент РК. № 29721. Установка для извлечения воды из образцов // *Электронный бюллетень*. Астана, 2015. бюл. № 4. URL: <http://kzpatents.com/4-ip29721-ustrojstvo-dlya-izvlecheniya-vody-iz-obrazcov.html> (дата обращения 25.12.2019).
- Качество воды. Определение объемной активности трития. Метод подсчета сцинтилляций в жидкой среде. Международный стандарт ISO 9698:2019. Астана: «КазИнСт», 2019. 32 с.
- Atarashi-Andoh M., Amano H., Ichimasa M., et al. Conversion rate of HTO to OBT in plants // *Fusion Science Technology*. 2002. Vol. 41, No 3. P. 427-431. DOI:10.13182/FST02-A22625.
- Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS) – A Summary Report of the Results of the EMRAS Programme (2003-2007) // IAEA safety standards and related publications. Vienna, Austria: IAEA, 2012. 50 p.
- Choi Y.H., Lim K.M., Lee W.Y., et al. Tissue free water tritium and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmospheric HTO vapor under semi-outdoor conditions // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002. No58. P. 67-85.
- Поливкина Е.Н., Ларионова Н.В., Ляхова О.Н. Оценка аэрозольного поглощения НТО культурой *Helianthus Annuus* в условиях Семипалатинского испытательного полигона // *Радиация и риск*. 2020. Т. 29, № 1 С. 79-89. URL: http://radiation-and-risk.com/images/pdf/2020/1/1_Article_7_79-89.pdf. (дата обращения 25.12.2019).
- Polivkina Ye.N., Larionova N.V., Lukashenko S.N., et al. Assessment of the tritium distribution in the vegetation cover in the areas of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 237. P. 67-85. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106705.
- Поливкина Е.Н., Ляхова О.Н., Ларионова Н.В., Субботина Л.Ф. Инкорпорирование трития культурой *Helianthus annuus* при корневом поступлении // *Вестник НЯЦ РК*. 2021. Т. 1. С. 48-53. DOI:10.52676/1729-7885-2021-1-48-53.
- Кособрухов А.А. Активность фотосинтетического аппарата при периодическом повышении CO₂ // *Физиология растений*. 2009. Т. 56, № 1, С. 8-16.
- Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». Изд. 2 / под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М.: Сам полиграфист, 2021. 555 с.

Поступила: 04.07.2022 г.

Поливкина Елена Николаевна – кандидат биологических наук, начальник лаборатории радиоэкологических исследований филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Адрес для переписки: 071100, Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбит-Атом, д.2; E-mail: polivkina@nnc.kz

Сысоева Елена Сергеевна – магистрант 2 курса Новосибирского государственного педагогического университета, специалист-эколог лаборатории радиоэкологических исследований филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Романенко Екатерина Викторовна – магистрант 2 курса Томского политехнического университета, инженер лаборатории ядерно-физических методов анализа филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Субботина Лилия Федоровна – инженер лаборатории радиоэкологических исследований филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Паницкий Андрей Васильевич – кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, начальник отдела комплексных исследований экосистем филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Жамалдинов Фаиль Ферхатович – аспирант 2 курса Томского политехнического университета, начальник лаборатории ядерно-физических методов анализа филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Кенжина Лаура Болатовна – кандидат медицинских наук, начальник лаборатории биодозиметрических исследований филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Для цитирования: Поливкина Е.Н., Сысоева Е.С., Романенко Е.В., Субботина Л.Ф., Паницкий А.В., Жамалдинов Ф.Ф., Кенжина Л.Б. Инкорпорирование трития культурами перца и баклажана при кратковременном воздействии окиси трития // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 97-105. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-97-105

Incorporation of tritium by pepper and eggplant cultures with short-term exposure to tritium oxide

Elena N. Polivkina, Elena S. Sysoyeva, Ekaterina V. Romanenko, Liliya F. Subbotina, Andrey V. Panitskiy,
Fail F. Zhamaldinov, Laura B. Kenzhina

Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov,
Kazakhstan

*The article presents results of a study of tritium incorporation by vegetable crops with short-term aerial exposure to tritium oxide in laboratory and field conditions. Plants are a key link in the process of tritium migration both in the ecosystem as a whole and in the trophic structure in particular. As a result of photosynthesis, much of tritium is incorporated into the organic matter of plants. In this aspect, the study of tritium incorporation processes and its possible contribution to human radiation exposure from ingested crop products is a relevant task. The aim of the study was to assess tritium incorporation by vegetable crops quantitatively at aerial entry of the radionuclide in the form of tritium oxide. To achieve this goal, laboratory (in the chamber) and field (in the territory of the former Semipalatinsk Test Site) experiments were conducted with commonly cultivated pepper (*Capsicum annuum*) and eggplant (*Solanum melongena*) that were affected by short-term exposure to tritium oxide vapors. Air was sampled with a tritium collector "OS 1700". Plant samples for measuring organically bound tritium were prepared using a "Sample Oxidizer" unit. Tritium activity in samples was measured with "QUANTULUS 1220". It was found that tissue free water tritium activity in leaves of *Capsicum annuum* and *Solanum melongena* was 1-2 orders of magnitude higher than in stems and fruits. The distribution of tissue free water tritium in both crops with a short-term aerial exposure is described by a decreasing series: "leaves < stems < fruits". The difference between the tissue free water tritium and organically bound tritium concentration in plants for all exposure variants was also 1-2 orders of magnitude. For*

Elena N. Polivkina

Institute of Radiation Safety and Ecology

Address for correspondence: ul. Beybit-Atom, 2, Kurchatov 071100, Kazakhstan; E-mail: polivkina@nnc.kz

organically bound tritium, no distinct regularity in the distribution of plant parts was established, which is most likely due to the short period of exposure. By the time the fruits were fully ripe, a significant decrease in the activity of tissue free water tritium (the main source of the formation of organically bound tritium in the post-exposure period) in all plant parts was observed. For organically bound tritium, both an increase and a decrease in the concentration were noted in leaves and stems, and in ripe fruits it remained almost at the same level as at the end of the exposure. The conversion rate of tritium in field conditions was 15–30 times than in the chamber. Organically bound tritium translocation into edible parts of vegetable crops in field conditions was 2–4 times higher than in the chamber, regardless of the tritium oxide concentration in air and leaves. According to a conservative assessment, the possible contribution to the dose of internal exposure from ingested tritium per 1 kg of vegetables contaminated as a result of short-term exposure, based on the absolute activity of radionuclide forms in *Capsicum annuum* and *Solanum melongena* fruits will be: for tissue free water tritium – 0.7 and 5.6 nSv; for organically bound tritium – 1.7 and 2.4 nSv, respectively. Since the levels of tritium oxide in the emissions of nuclear fuel cycle enterprises are much lower compared to experimental ones, the possible contribution of tritium to the dose of public internal exposure from the ingestion with crop products after a short-term tritium oxide exposure will be negligible.

Key words: tritium, tritium oxide, tissue free water tritium, organically bound tritium, conversion rate, translocation index, contribution to radiation exposure.

Personal participation of authors

Polivkina E.N. was in charge of the general project management. She arranged and supervised the experimental work in vitro and, in the field, sampled a portion of plants, analyzed literature data and findings, prepared the original version of a manuscript, designed the final version of the manuscript to be published in the journal.

Sysoyeva E.S. was involved in managing the experimental work afield, sampled a portion of plants, analyzed literature data, edited the intermediate manuscript version.

Subbotina L.F. prepared plant samples for beta-spectrometric measurements of tissue free water tritium activity concentration and in the organic matter.

Zhamaldinov F.F. arranged activities on the beta-spectrometric sample analysis for the content of organically bound tritium and tritium oxide, calibrated the instrumentation, edited the intermediate manuscript version.

Romanenko E.E. carried out a beta-spectrometric analysis of samples for the content of organically bound tritium and tritium oxide, interpreted results of beta-spectrometric measurements, assessment of the contribution of tritium forms to the dose load during oral consumption of contaminated crop products.

Panitskiy A.V. was involved in arranging the field work, edited the intermediate manuscript version.

Kenzhina L.B. analyzed literature data on the assessment of public radiation exposure attributed to the consumption of foodstuffs containing organically bound tritium and tritium oxide, edited the intermediate manuscript version.

Acknowledgement

Authors appreciate Ivanova A.R., Timonova L.V., Tomilov K.E., Abdigamitov B.B. (branch “Institute of Radiation Safety and Ecology” National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan), and T.S. Ponomaryova (“Ecoekspert”) assistance in laboratory and field activities.

The conflict of interests

Authors state that the work and preparation of this article imply no conflict of interests whatsoever.

Sources of funding

The work was funded under the Budget program 217 «Scientific development», subprogram 102 «Grant funding of scientific research» (Project AP0808956713 «Research into radiological and hygienic hazard posed by man-made tritium when accumulated by crop products for assessing public radiation exposure»).

References

- Weinberg AM. The future of nuclear energy. *Physics Today*. 1981 Oct;34(3): 48–56.
- Boyer C, Vichot L, Fromm M, Losset Y. Tritium in plants: a review of current knowledge. *Environmental and Experimental Botany*. 2009 Nov;67(1):34–51. DOI:10.1016/j.envexpbot.2009.06.008.
- Kim SB, Baglan N, Davis PA. Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the environment. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013 Dec;126: 83–91. DOI:10.1016/j.jenvrad.2013.07.011.
- Melintescu A, Galeriu D. Uncertainty of current understanding regarding OBT formation in plants. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017 Feb;167: 134–149. DOI:10.1016/j.jenvrad.2016.11.026.
- Erolle F, Ducros L, Séverine LD, Beaugellin-Seiller K. An updated review on tritium in the environment. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018 Jan;181: 128–137. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.11.001.
- Strack S, Diabat S, Muller J, Rascob W. Organically bound tritium formation and translocation in crop plants, modelling and experimental results. *Fusion Science and Technology*. 1995 Aug;28(3): 951–956. DOI:10.13182/FST95-A30528.
- ICRP Publication 67 (Annals of the ICRP Vol. 23 No. 3/4) Age-dependent doses to members of the public from intakes of radionuclides: Part 2 Ingestion dose coefficients. International commission on radiological protection. Oxford: Elsevier Science; 1993. 167 p.
- Balonov MI, Chipiga LA. Assessment of the dose from the intake of tritium oxide into the human body: the role of tritium inclusion in the organic matter of tissues. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 16–25. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-16-25. (In Russian).
- Hisamatsu S, Takizawa Y. Tritium transfer from diet to human. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1995 Nov;197(2): 271–280. DOI:10.1007/bf02036005.
- Harrison JD, Khursheed A, Lambert BE. Uncertainties in dose coefficients for intakes of tritiated water and organically-bound forms of tritium by members of the public. *Radiation*

- Protection Dosimetry*. 2002 Mar;98(3): 299-311. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006722.
11. Lyakhova ON, Lukashenko SN, Larionova NV, Tur YS. Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk test site. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012 Nov;113: 98-107. DOI:10.1016/j.jenvrad.2012.02.010.
 12. Sharakshane A. Whole high-quality light environment for humans and plants. *Life Sciences in Space Research*. 2017 Nov;15: 18-22. DOI: 10.1016/j.lssr.2017.07.001.
 13. Lukashenko SN, Larionova NV, Zarembo VP. Innovative patent of the Republic of Kazakhstan. № 29721. Bulletin No.: 4, 2015. Installation for extracting water from samples. Available from: <http://kzpatents.com/4-ip29721-ustrojstvo-dlya-izvlecheniya-vody-iz-obrazcov.html> (Date of application 25.12.2019) (Accessed April 15, 2015).
 14. Water quality. Determination of the volumetric activity of tritium. Method of counting scintillations in a liquid medium. International standard ISO 9698:2019. Astana: KazInSt; 2019. 32 p.
 15. Atarashi-Andoh M, Amano H, Ichimasa M, Ichimasa Y. Conversion rate of HTO to OBT in plants. *Fusion Science Technology*. 2002 Nov;41(3): 427-431. DOI:10.13182/FST02-A22625.
 16. Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS) – A Summary Report of the Results of the EMRAS Programme (2003-2007). IAEA safety standards and related publications. Vienna, Austria: IAEA; 2012. 50 p.
 17. Choi YH, Lim KM, Lee WY, Diabaté S. Tissue free water tritium and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmospheric HTO vapor under semi-outdoor conditions. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002 Jan;58(1): 67-85. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00024-8.
 18. Polivkina YeN, Larionova NV, Lyakhova ON. Assessment of aerosol uptake of HTO by *Helianthus Annuus* culture in the conditions of the Semipalatinsk test site. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2020;29(1):79-89. (In Russian).
 19. Polivkina YeN, Larionova NV, Lukashenko SN, Luakhova ON. Assessment of the tritium distribution in the vegetation cover in the areas of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021 Oct;237: 106705. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106705.
 20. Polivkina YN, Lyakhova ON, Larionova NV, Subbotina LF. Incorporation of tritium by *Helianthus annuus* when entering through the roots. *Vestnik NYATS RK=NNC RK Bulletin*. 2021Jun;(1): 48-53. (In Russian). DOI:10.52676/1729-7885-2021-1-48-53.
 21. Kosobryukhov AA. The activity of the photosynthetic apparatus with a periodic increase in CO₂. *Fiziologiya rasteniy = Plant physiology*. 2009;56(1): 8-16. (In Russian).
 22. Radioecological situation in the regions where enterprises are located State Atomic Energy Corporation "Rosatom". 2nd ed. Ed. by I.I. Linge and I.I. Krysheva. Moscow: Sam poligrafist; 2021. 555 p. (In Russian).

Received: July 04, 2022

For correspondence: Elena N. Polivkina – candidate of biological sciences, head of the Laboratory of Radioecological Research, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan (ul. Beybit-Atom, 2, Kurchatov 071100, Kazakhstan; E-mail: polivkina@nnc.kz)

Elena S. Sysoyeva – 2nd year Master's student (Novosibirsk State Pedagogical University), ecologist of the laboratory of radioecological research, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

Ekaterina V. Romanenko – 2nd year Master's student (Tomsk polytechnic university), engineer of the laboratory of nuclear physical methods of analysis, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

Liliya F. Subbotina – engineer of the laboratory of radioecological research, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

Andrey V. Panitskiy – PhD, associate professor, head of the department of integrated ecosystem research, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

Fail F. Zhamaldinov – 2nd year postgraduate student (Tomsk polytechnic university), head of the laboratory of nuclear physical methods of analysis, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

Laura B. Kenzhina – candidate of medical sciences, head of the laboratory of dosimetric research, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

For citation: Polivkina E.N., Sysoyeva E.S., Romanenko E.V., Subbotina L.F., Panitskiy A.V., Zhamaldinov F.F., Kenzhina L.B. Incorporation of tritium by pepper and eggplant cultures with short-term exposure to tritium oxide. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 97-105. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-97-105