

УДК 539.163:546.11:621.039

## ОЦЕНКА УРОВНЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗООБРАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРИТИЯ В МЕСТАХ ПРОВЕДЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

© 2020 г. О. Н. Ляхова<sup>1,\*</sup>, С. Н. Лукашенко<sup>1</sup>, Л. В. Тимонова<sup>1</sup>, Н. В. Ларионова<sup>1</sup>, Д. В. Турченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Филиал “Институт радиационной безопасности и экологии” РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

\*E-mail: Lyahova@nnc.kz

Поступила в редакцию 03.11.2018 г.

После доработки 17.10.2019 г.

Принята к публикации 12.02.2020 г.

Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями поступления трития в приземный слой атмосферы на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Исследования выполнены в местах проведения ядерных испытаний различного характера. Установлено, что тритий в воздушной среде СИП присутствует в двух формах – в окисленной, в виде тритиевой воды НТО, и в газообразной, в виде органических летучих соединений  $T_{\text{газ}}$ . Наименьшая концентрация трития в воздушной среде на площадке “Опытное поле” отмечена в местах проведения наземных и воздушных взрывов. Участки с максимальной концентрацией трития в воздухе расположены на площадке “Балапан” в местах проведения подземных ядерных испытаний. Показано, что удельная активность трития в поверхностном слое почвы на ряде участков исследования составляла от сотен до десятков тысяч Бк/кг. Сделано предположение, что в местах проведения ядерных испытаний почва ввиду высокого содержания в ней трития может выступать в роли важного источника поступления  $T_{\text{газ}}$  в атмосферу.

**Ключевые слова:** воздух, тритий, места проведения ядерных испытаний, окисленные соединения трития, газообразные соединения трития

**DOI:** 10.31857/S086980312006020X

Тритий (Т), как изотоп водорода, может замещать его во всех соединениях с кислородом, серой, азотом, легко поступая в атмосферный воздух. Основными формами Т, присутствующими в воздухе, являются тритированные водяные пары (НТО), тритированный водород (НТ) и тритированный метан ( $\text{CH}_3\text{T}$ ).

Тритированные водяные пары являются наиболее изученной формой для территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Определены уровни концентрации НТО на основных испытательных площадках полигона, изучены источники поступления и проведена оценка характера распределения НТО в воздушной среде [1]. В результате проведенных исследований установлено, что на ряде радиационно-опасных объектов полигона Т может присутствовать в воздухе в виде газообразных соединений ( $T_{\text{газ}}$ ), которые ранее на данной территории не изучались.

Цель данной работы – оценка уровня концентрации  $T_{\text{газ}}$  в местах проведения ядерных испытаний на СИП.

Для лучшего понимания процесса поступления  $T_{\text{газ}}$  в воздух в работе представлены данные о содержании НТО в воздухе и о содержании Т в почве на всех испытательных площадках СИП [2].

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований являлся почвенный и атмосферный воздух.

Исследования проведены на территории СИП в местах осуществления различных по характеру ядерных испытаний. Это – испытательная площадка “Опытное поле” (наземные и воздушные испытания), площадка “Дегелен” (подземные испытания в штольнях), площадки “Балапан” и “Сары-Узень” (подземные испытания в скважинах), площадка “Телькем” и воронка “Атомное” озеро (экскавационные взрывы), русло р. Шаган (рис. 1).

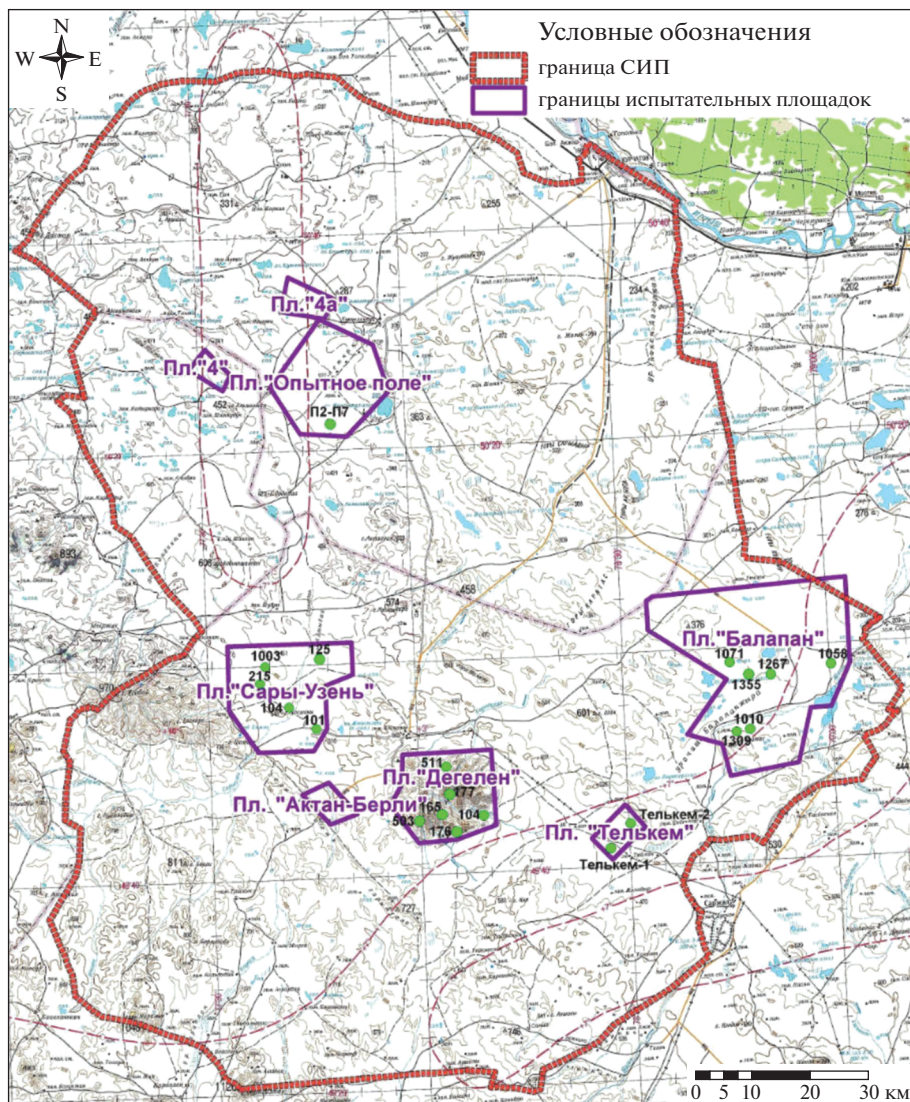


Рис. 1. Схема расположения участков исследования на территории СИП.

Fig. 1. Scheme of research sites' location at the STS territory.

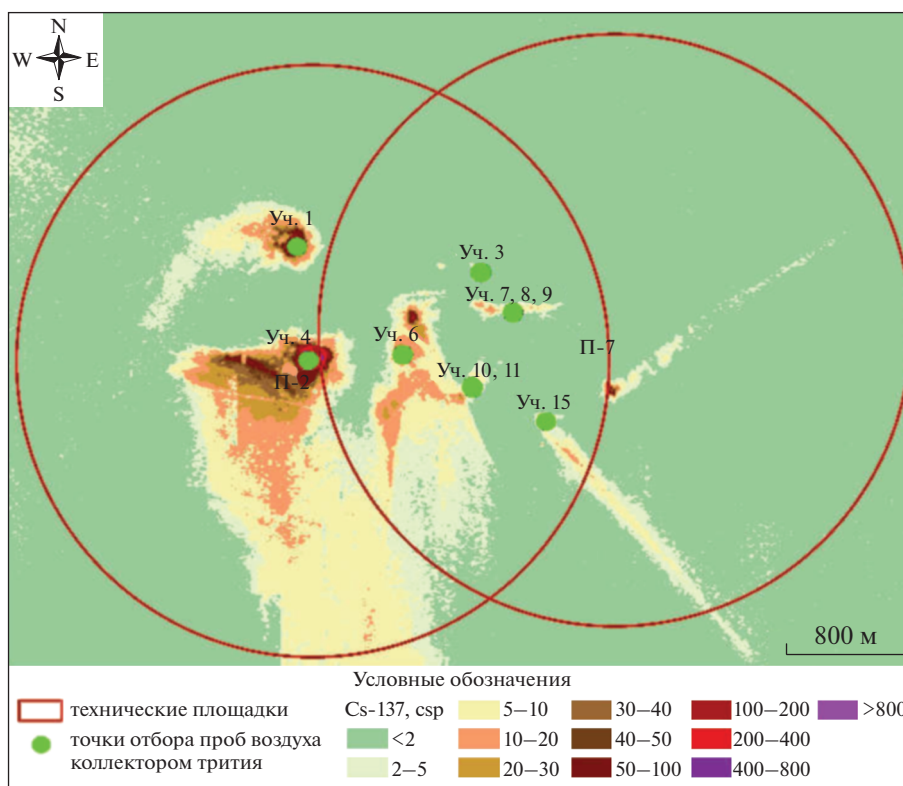
#### Характеристика участков исследования

**Испытательная площадка "Опытное поле".** Исследования проведены на семи локальных участках, расположенных в местах расположения эпицентров ядерных испытаний на технических площадках (П2, П7) (рис. 2). Данные участки характеризуются высокой удельной активностью искусственных радионуклидов в почве, таких как  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{152}\text{Eu}$  [3, 4]. Удельная активность Т в почве составляет в пределах 70000 Бк/кг [2].

**Площадка "Дегелен".** Основная доля радиоактивности на этой площадке сосредоточена в полостях штолен. Однако, за счет выноса радионуклидов из эпицентров штольневых водотоками, на приустьевых участках целого ряда штолен отме-

чается высокое содержание Т. Удельная активность НТО в воде и растениях составляла  $10^3$ – $10^5$  Бк/кг [5], объемная активность НТО в воздухе – от 1 до  $10^3$  Бк/м<sup>3</sup> [6]. Отбор проб почвенного воздуха проводили на порталах штолен № 503, 511, 176, 177, 165 и 104 (рис. 1).

**Площадка "Балапан".** Здесь загрязнение местности незначительно, так как при проведении подземных взрывов в скважинах радиоактивные продукты остались "захороненными" в геологической толще пород. Поверхностных вод в местах расположения скважин нет. Удельная активность НТО в грунтовых водах изменяется в широком диапазоне значений от 0.01 до 4000 кБк/л, глубина залегания в пределах площадки составляет 1–5 м [7]. В растениях удельная активность Т изменяется в пределах от 20 до 70 Бк/кг, объемная активность Т в



**Рис. 2.** Расположение участков исследования на технических площадках П2, П7 “Опытного поля”.  
**Fig. 2.** Location of research sites at the technical grounds P2, P7 of the “Опытное поле”.

почвенном воздухе может достигать  $300 \text{ Бк/м}^3$ , в атмосферном – до  $70 \text{ Бк/м}^3$  [1]. Содержание Т в почве составляет до  $10^4 \text{ Бк/кг}$ . Отбор проб атмосферного и почвенного воздуха проводили на приустьевых участках скважин № 1071, 1267, 1058, 1010, 1355 и 1309 (рис. 1).

Более детальные исследования проведены на приустевом участке скважины № 1010, вблизи которой ранее была зафиксирована максимальная концентрация НТО в атмосферном и почвенном воздухе [1]. Данная скважина отнесена к “критическим” вследствие проявления эффектов газоносности (повышенное содержание газов в почвенном воздухе) в месте ее расположения, а также ввиду наличия различных механических последствий проведения ПЯВ (изменение рельефа, образование провальных воронок и т.д.) [8]. Отбор проб вблизи скважины № 1010 проводили по двум лучам, проходящим с северо-востока на юго-запад и с северо-запада на юго-восток с центральной точкой в месте расположения устья скважины, на расстоянии 10, 25 и 50 м от ее оголовка (рис. 3).

**Площадка “Сары-Узень”.** Распределение радионуклидов по компонентам окружающей среды идентично площадке “Балапан”. Исследования содержания  $T_{\text{газ}}$  проводили в атмосферном и поч-

венном воздухе на участках скважин № 125, 215, 104, 111, 1003 и 101, где радионуклидное загрязнение вызвано нештатными радиационными ситуациями, имевшими место во время испытаний [9] (рис. 1).

Воронки скважин № 101 и № 125 заполнены водой. Удельная активность НТО в поверхностных водах составляет от 500 до  $200\,000 \text{ Бк/л}$ , в подземных – достигает порядка  $500\,000 \text{ Бк/л}$ . Удельная активность НТО в растениях составляет от 90 до  $80\,000 \text{ Бк/кг}$ , в почве – до  $48\,000 \text{ Бк/кг}$  [10]. На приустевых участках скважин, заполненных водой, отбор проб проводили по периметру в двух-четыре точки (рис. 4). На остальных скважинах пробы отбирали непосредственно возле устья.

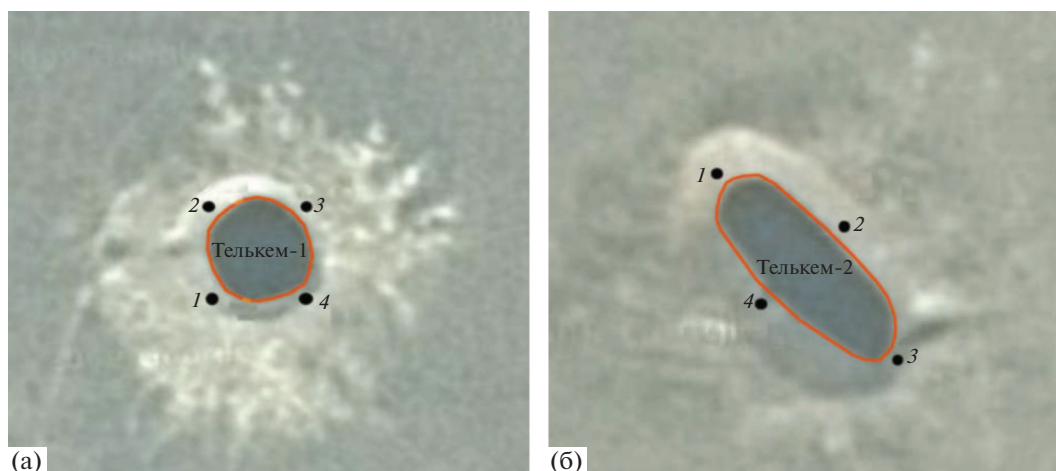
**Места проведения экскавационных испытаний.** В результате проведения такого вида испытаний в местах подрыва ядерных зарядов образовались воронки радиусом в сотни и глубиной несколько десятков метров, которые наполнились паводковыми водами. Наиболее крупные из них – воронка “Атомное озеро” на площадке “Балапан”, и воронки “Телькем-1” и “Телькем-2” на площадке “Телькем” (рис. 1).

В грунтах навала вокруг воронки “Атомного озера” содержание связанных форм Т достигает  $65\,000 \text{ Бк/кг}$ , концентрация НТО – от 400 до









**Рис. 5.** Схема отбора проб на воронках площадки “Телькем”: а – Телькем-1; б – Телькем-2.  
**Fig. 5.** Scheme of sampling at craters of the “Telkem” site: a – Telkem-1; b – Telkem-2.

воздуха. Для этого участок отбора проб накрывали изолирующей емкостью цилиндрической формы, объемом 100 л. Края емкости заглубляли в почву, которую затем сверху хорошо уплотняли. Предварительно, до начала забора воздуха, внутри емкости, с помощью вакуумного насоса, создавалось разрежение порядка 25–30 Па, контролируемое манометром. Затем изолирующая емкость через специальный отвод соединялась с коллектором для проведения отбора проб.

Для отбора проб почвенного воздуха на порталах штолен (площадка “Дегелен”) изолирующую емкость устанавливали на поверхность насыпи портала таким образом, чтобы она ориентировочно располагалась на уровне центральной оси котловой полости штольни. Для определения участков отбора проб использовались архивные данные о схематическом строении штолен и визуальное определение месторасположения порталов.

Время отбора одной пробы составляло не менее 120 мин, объем прокаченного воздуха – порядка 60 м<sup>3</sup>.

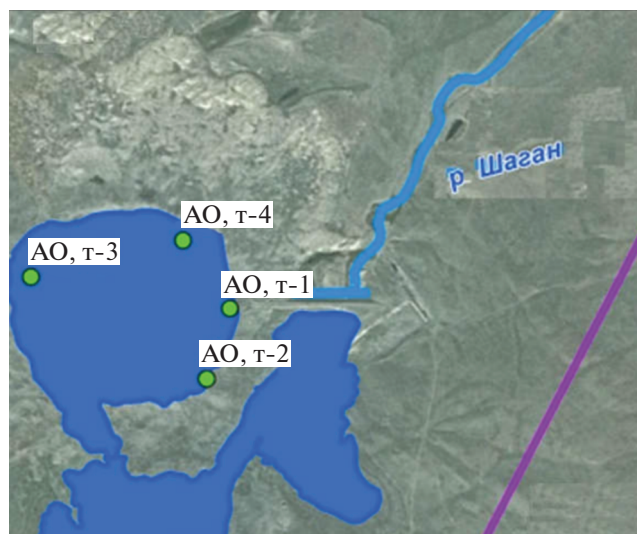
Выделение различных форм Т из воздуха проводили при помощи коллектора трития “OS 1700” фирмы “ORTEC” (США). Прибор позволяет разделять улавливать Т в виде НТО и Т<sub>газ</sub> методом 2-стадийного последовательного барботирования через дистиллированную воду. Принципиальная схема работы прибора представлена на рис. 7.

Воздух закачивается в систему и пропускается через фильтр для отсеивания твердых примесей. На первой стадии (А, В, С) собирается тритиевая вода (НТО), содержащаяся во входном потоке. Далее воздушный поток пропускается через палладиевую спираль, нагретую до 450°С, чтобы катализировать процесс распада газообразных соединений, содержащих Т. Полученные в резуль-

тате каталитического окисления газообразные соединения Т вновь барботируют через дистиллированную воду и собирают на второй стадии (D, E, F).

Скорость прокачки воздуха 500 см<sup>3</sup>/мин, эффективность улавливания – порядка 98% [14].

Подготовку образцов для измерений удельной активности Т проводили в соответствии с аттестованной методикой [15]. Для удаления механических примесей пробы фильтровали, затем отбирали образец объемом 5 мл и помещали в пластиковую вialу объемом 20 мл с добавлением сцинтилляционного коктейля в пропорции 1 : 3 (от-



**Рис. 6.** Схема отбора проб на гребне воронки “Атомного” озера.  
**Fig. 6.** Scheme of sampling at the crest of the “Atomic” lake’s crater.

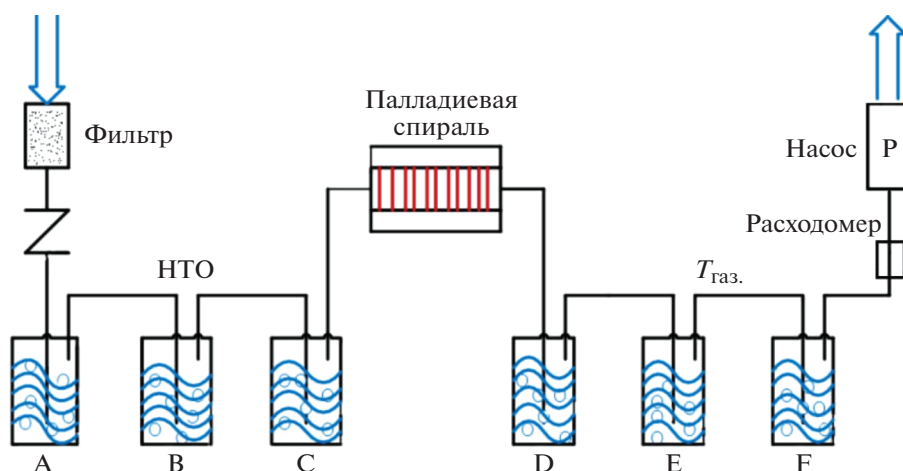


Рис. 7. Принципиальная схема системы отбора проб воздуха.  
Fig. 7. The principle scheme of air sampling.

ношение образец – сцинтилятор). Для анализа представляемых проб использовали сцинтиляционный коктейль “Ultima Gold LLT”, разработанный специально для измерения Т в природных образцах (эффективность регистрации для Т в диапазоне 0–15 КэВ порядка 60%). Минимально детектируемая активность для определения Т составила 2 Бк/кг, что при принятой методике отбора проб составляет порядка 0.5 Бк/м<sup>3</sup>.

Определение активности Т в отобранных образцах проводили при помощи низкофонового жидкосцинтиляционного спектрометра “Quantulus 1220” фирмы “PerkinElmer” (Финляндия). Время измерения подготовленного счетного образца составляло 120–180 мин. Обработку спектра и расчет удельной активности Т осуществляли с помощью программы “QuantaSmart” [16].

Таблица 1. Удельная активность Т<sub>газ.</sub> в почвенном воздухе и почве на площадке “Опытное поле”  
Table 1. Volumetric activity of Т<sub>газ.</sub> in soil air at the “Опытное поле” site

Точка отбора	Объемная активность, Бк/м <sup>3</sup>		Удельная активность Т в почве, Бк/кг
	Т <sub>газ.</sub>	НТО	
П2/П7, уч. 1	<0.5	0.8 ± 0.5	4600 ± 500
П2/П7, уч. 3	<0.5	<0.5	3000 ± 300
П2/П7, уч. 4	<0.5	<0.5	6200 ± 600
П2/П7, уч. 6	<0.5	<0.5	3400 ± 300
П2/П7, уч. 7, 8, 9	<0.5	<0.5	2800 ± 300
П2/П7, уч. 10, 11	<0.5	<0.5	<120
П2/П7, уч. 15	<0.5	<0.5	4300 ± 400

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для изучения механизмов формирования триевого загрязнения воздушной среды на всех испытательных площадках СИП было проведено определение содержания НТО в воздухе и валового содержания Т в почве.

### Площадка “Опытное поле”

Согласно полученным в апреле 2014 г. данным, содержание Т<sub>газ.</sub> на исследуемой территории составило менее предела обнаружения. На уч. 1 зафиксировано присутствие НТО в воздухе, объемной активностью 0.8 Бк/м<sup>3</sup> (табл. 1), где расположен кратер, образованный от проведения наземного ядерного взрыва.

На исследуемом участке нет поверхностных водотоков, которые могли бы стать источником поступления НТО в атмосферу. Однако установлено, что удельная активность НТО в растениях на отдельных участках достигает 120 Бк/кг [17], содержание Т в почве – от 200 до 11000 Бк/кг [2]. Важно отметить, что на данной территории Т в почве присутствует только в поверхностном слое 0–5 см.

### Площадка “Дегелен”

На этой площадке в летний период (июль, август 2015 г.) присутствие Т<sub>газ.</sub> в почвенном воздухе было установлено для трех штолен – № 176, 165 и 104, объемной активностью 1.2–2.0 Бк/м<sup>3</sup>. Четкой взаимосвязи между содержанием Т<sub>газ.</sub> в воздухе и Т в почве на момент проведения исследований не установлено (табл. 2).

Согласно полученным результатам, содержание НТО в воздухе всех исследуемых участков значительно выше Т<sub>газ.</sub>. Причиной этого является



**Таблица 2.** Удельная активность  $T_{\text{газ}}$  в почвенном воздухе и почве на площадке “Дегелен”  
**Table 2.** Volumetric activity of  $T_{\text{газ}}$  in soil air at the “Dege-len” site

Точка отбора	Объемная активность, Бк/м <sup>3</sup>		Удельная активность Т в почве, Бк/кг
	$T_{\text{газ}}$	НТО	
шт. 176	$2.0 \pm 0.5$	$700 \pm 140$	$600 \pm 60$
шт. 165	$1.2 \pm 0.5$	$520 \pm 100$	$150 \pm 50$
шт. 104	$1.5 \pm 0.5$	$115 \pm 20$	<50
шт. 503	<0.5	$4.5 \pm 0.5$	<50
шт. 511	<0.5	$1.0 \pm 0.5$	<50
шт. 177	<0.5	$7.0 \pm 1.0$	$300 \pm 30$

высокая концентрация НТО в воде и растительности [5].

#### Площадка “Балапан”

Здесь в летние месяцы (июль и август 2014 г.) присутствие  $T_{\text{газ}}$  отмечалось на приустьевых участках всех скважин, за исключением № 1058 (табл. 3). При этом частота встречаемости присутствия  $T_{\text{газ}}$  в почвенном воздухе выше, чем в атмосферном. Численные значения удельной активности Т в почве были зафиксированы также на всех участках исследования, за исключением скважины № 1058.

Установлено, что на площадке “Балапан” значения концентрации  $T_{\text{газ}}$  в воздушной среде сравнимы со значениями концентрации НТО на одних и тех же участках исследования. Максимальная концентрация  $T_{\text{газ}}$  отмечена вблизи скважины № 1010, где позднее повторно были проведены более детальные исследования (июль 2015 г.).

Максимальная концентрация  $T_{\text{газ}}$  зафиксирована вблизи устья скважины –  $150$  и  $70$  Бк/м<sup>3</sup> в ат-

мосферном и почвенном воздухе соответственно. При этом содержание  $T_{\text{газ}}$  в воздухе на порядок превысило содержание НТО.

Выявлено, что места выхода  $T_{\text{газ}}$  в воздушную среду не имеют точной привязки к месторасположению устья. Численные значения концентрации  $T_{\text{газ}}$  в воздухе зафиксированы на расстоянии от 10 до 50 м от скважины (табл. 4). Полученные результаты указывают на то, что процесс эманации  $T_{\text{газ}}$  может происходить на всем приустьевом участке.

#### Площадка “Сары-Узень”

На площадке “Сары-Узень” в августе 2016 г. было выявлено, что на территории приустьевых участков всех скважин наблюдается присутствие  $T_{\text{газ}}$ , за исключением скважины № 1003.

Концентрация НТО в воздухе скважин № 25 и № 101 значительно выше  $T_{\text{газ}}$ . Причиной этому является высокая концентрация НТО в воде и растительности [18]. На приустьевых участках остальных скважин значения концентрации  $T_{\text{газ}}$  в воздушной среде сравнимы с концентрацией НТО.

На участках скважин № 125, 1003 и 101 отмечено высокое содержание Т в почве (табл. 5). Прямой корреляции между содержанием Т в почве и в воздухе не установлено.

#### Места проведения экскавационных взрывов (площадка “Телькем” и “Атомное озеро”)

Согласно полученным данным, на площадке “Телькем” в конце апреля, а на территории “Атомного озера” – в начале сентября 2015 г. в местах проведения экскавационных взрывов наблюдалось присутствие  $T_{\text{газ}}$  в воздушной среде.

На площадке “Телькем” численные значения  $T_{\text{газ}}$  отмечены только в почвенном воздухе на двух

**Таблица 3.** Удельная активность  $T_{\text{газ}}$  в атмосфере, почвенном воздухе и почве вблизи устья боевых скважин на площадке “Балапан”

**Table 3.** Volumetric activity of  $T_{\text{газ}}$  in the air nearby the warfare boreholes at the “Balapan” site

Номер скважины	Объемная активность, Бк/м <sup>3</sup>				Удельная активность Т в почве, Бк/кг
	$T_{\text{газ}}$		НТО		
	атм.	почв.	атм.	почв.	
1071	<0.5	$0.8 \pm 0.5$	$3.0 \pm 1.0$	$5 \pm 1$	$500 \pm 50$
1267	$0.9 \pm 0.5$	$1.2 \pm 0.5$	$3.5 \pm 1.0$	$220 \pm 20$	$12000 \pm 1200$
1058	<0.5	<0.5	$5.0 \pm 0.5$	$3.5 \pm 0.7$	<50
1010	$190 \pm 15$	$40 \pm 6$	$15 \pm 1$	$45 \pm 2$	$12500 \pm 1200$
1355	$3.0 \pm 0.5$	$3.5 \pm 0.5$	<0.5	<0.5	$700 \pm 70$
1309	<0.5	$3.0 \pm 0.5$	<0.5	<0.8	$200 \pm 50$

**Таблица 4.** Удельная активность  $T_{\text{газ}}$  в атмосфере, почвенном воздухе и почве на приустьевом участке скважины № 1010**Table 4.** Volumetric activity of  $T_{\text{газ}}$  in atmospheric and soil air at the near-mouth site of the borehole № 1010

Точка отбора	Объемная активность, Бк/м <sup>3</sup>				Удельная активность Т в почве, Бк/кг
	$T_{\text{газ}}$		НТО		
	атм.	почв.	атм.	почв.	
Устье скважины	150 ± 15	70 ± 6	7 ± 1	15 ± 2	12500 ± 1200
10 м, СВ*	8 ± 1	2.2 ± 0.2	<0.5	2.0 ± 0.2	—**
25 м, СВ	<0.5	0.10 ± 0.05	<0.5	0.7 ± 0.1	—
50 м, СВ	—	<0.5	—**	<0.5	—
10 м, ЮЗ	<0.5	<0.5	<0.5	0.8 ± 0.1	—
25 м, ЮЗ	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	—
50 м, ЮЗ	—	0.20 ± 0.05	—	<0.5	—
10 м, СЗ	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	—
25 м, СЗ	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	—
50 м, СЗ	—	<0.5	—	<0.5	—
10 м, ЮВ	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	—
25 м, ЮВ	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	—
50 м, ЮВ	—	<0.5	—	<0.5	—

**Таблица 5.** Удельная активность  $T_{\text{газ}}$  в атмосфере, почвенном воздухе и почве на площадке “Сары-Узень”**Table 5.** Volumetric activity of  $T_{\text{газ}}$  in air at the “Sary-Uzen” site

Точка отбора	Объемная активность, Бк/м <sup>3</sup>				Удельная активность Т в почве, Бк/кг
	$T_{\text{газ}}$		НТО		
	атм.	почв.	атм.	почв.	
Скв. 125, С*	0.8 ± 0.5	1.0 ± 0.5	35 ± 3	110 ± 20	460 ± 50
Скв. 125, Ю	1.3 ± 0.5	1.0 ± 0.5	14 ± 3	60 ± 7	230 ± 50
Скв. 125, З	1.0 ± 0.5	1.2 ± 0.5	13 ± 3	15 ± 7	200 ± 50
Скв. 125, В	1.0 ± 0.5	1.0 ± 0.5	22 ± 2	290 ± 30	1300 ± 120
Скв. 215 устье	1.2 ± 0.5	0.9 ± 0.5	2.0 ± 0.5	5.5 ± 1.0	230 ± 50
Скв. 104 устье	1.3 ± 0.5	1.0 ± 0.5	0.8 ± 0.5	1.0 ± 0.5	<60
Скв. 111 устье	0.7 ± 0.5	1.1 ± 0.5	0.8 ± 0.5	0.9 ± 0.5	<60
Скв. 1003, устье	<0.5	<0.5	<0.5	3.0 ± 1.0	5300 ± 500
Скв. 101, Ю	0.7 ± 0.5	1.0 ± 0.5	420 ± 85	40 ± 5	48500 ± 5000
Скв. 101, С	2.0 ± 0.5	1.3 ± 0.5	70 ± 5	760 ± 80	190 ± 60

участках исследования. При этом содержание Т в почве составило менее предела обнаружения.

На гребне воронки “Атомного озера” численные значения  $T_{\text{газ}}$  в атмосферном воздухе также были зафиксированы на двух участках — объемная активность 0.7 и 3 Бк/м<sup>3</sup> соответственно. В почвенном воздухе содержание  $T_{\text{газ}}$  изменялось в пределах от 0.3 до 3.5 Бк/м<sup>3</sup>. Значения концен-

трации  $T_{\text{газ}}$  сравнимы со значениями концентрации НТО.

#### *Река Шаган*

В русле реки в июле 2015 г. присутствие  $T_{\text{газ}}$  в воздухе не ожидалось. Однако, согласно полученным результатам, значения объемной активности составили 0.8 и 1.3 Бк/м<sup>3</sup> в атмосферном и поч-



**Таблица 6.** Удельная активность  $T_{\text{газ}}$  в атмосфере, почвенном воздухе и почве на площадках “Телькем” и “Атомное озеро”**Table 6.** Volumetric activity of  $T_{\text{газ}}$  in air at the “Atomic” lake and the “Telkem” site

Точка отбора	Объемная активность, Бк/м <sup>3</sup>				Удельная активность Т в почве, Бк/кг
	$T_{\text{газ}}$		НТО		
	атм.	почв.	атм.	почв.	
“Телькем-1”, т. 1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<110
“Телькем-1”, т. 2	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<120
“Телькем-1”, т. 3	<0.5	1.0 ± 0.5	<0.5	1.6 ± 0.1	<130
“Телькем-1”, т. 4	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<110
“Телькем-2”, т. 1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<90
“Телькем-2”, т. 2	<0.5	0.9 ± 0.5	<0.5	<0.5	<120
“Телькем-2”, т. 3	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<100
“Телькем-2”, т. 4	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<120
“Атомное” озеро, т. 1	3.0 ± 0.5	3.5 ± 0.5	8.0 ± 1.0	2.5 ± 0.5	21000 ± 2000
“Атомное” озеро, т. 2	<0.5	0.8 ± 0.5	5.0 ± 0.5	2.2 ± 0.5	32000 ± 3500
“Атомное” озеро, т. 3	<0.5	6.0 ± 0.5	0.1 ± 0.5	1.7 ± 0.5	78000 ± 8000
“Атомное” озеро, т. 4	0.7 ± 0.1	<0.5	2.2 ± 0.5	1.8 ± 0.5	22000 ± 2000

**Таблица 7.** Удельная активность  $T_{\text{газ}}$  в атмосфере, почвенном воздухе и почве на берегах р. Шаган**Table 7.** Volumetric activity of  $T_{\text{газ}}$  in air in the Shagan river' channel

Точка отбора	Объемная активность, Бк/м <sup>3</sup>				Удельная активность Т в почве, Бк/кг
	$T_{\text{газ}}$		НТО		
	атм.	почв.	атм.	почв.	
т. 1, левый берег	0.8 ± 0.5	1.3 ± 0.5	40 ± 5	100 ± 12	2500 ± 250
т. 2, правый берег	<0.5	<0.5	10 ± 1	25 ± 2	1000 ± 100

венном воздухе соответственно. Значения объемной активности НТО в воздухе гораздо выше, от 10 до 100 Бк/м<sup>3</sup> (табл. 7).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что уровень концентрации  $T_{\text{газ}}$  в воздухе на территории СИП лежит в широком диапазоне значений. В атмосферном воздухе объемная активность  $T_{\text{газ}}$  изменялась от <0.5 до 190 Бк/м<sup>3</sup>, в почвенном – от <0.5 до 70 Бк/м<sup>3</sup>.

Минимальная концентрация  $T_{\text{газ}}$  зафиксирована на площадке “Опытное поле”, где его содержание составило менее предела обнаружения (<0.5 Бк/м<sup>3</sup>). Это может быть обусловлено тем, что Т в грунтах содержится только в поверхностном слое 0–5 см, а в растительности его концентрация невелика. Таким образом, абсолютное количество  $T_{\text{газ}}$ , которое может образовываться на данном участке и поступать в воздух, является незначительным.

Максимальная объемная активность  $T_{\text{газ}}$  отмечена в воздухе на приустьевом участке боевой скважины № 1010 на площадке “Балапан”. Здесь значения концентрации  $T_{\text{газ}}$  на порядок выше, чем значения концентрации НТО на тех же участках. Отмечено, что значения объемной активности  $T_{\text{газ}}$  в воздушной среде вблизи устья этой скважины могут значительно колебаться, однако уровень остается достаточно высоким. Так, значения концентрации  $T_{\text{газ}}$  в воздухе в 2015 г. существенно превысили те же значения, полученные годом ранее (табл. 3). Сделано предположение, что причиной этому являются некие характерные процессы, протекающие внутри полости скважины. Предположительно Т, содержащийся в полостях скважин, может поступать в воздушную среду с выходящими газами, в виде Т<sub>2</sub>, НТ и СН<sub>3</sub>Т [8].

На площадке “Сары-Узень” и воронке “Атомное озеро” содержание  $T_{\text{газ}}$  в атмосферном и почвенном воздухе находилось в пределах 3.5 Бк/м<sup>3</sup>,

что на два порядка ниже, чем на площадке “Балапан”.

Концентрация  $T_{\text{газ}}$  в воздухе на площадке “Дегелен” и в русле р. Чаган изменялась от 0.5 до 1.3 Бк/м<sup>3</sup> и сравнима с его концентрацией на площадке “Телькем”, от 0.9 до 1.0 Бк/м<sup>3</sup>.

Среднее значение концентрации  $T_{\text{газ}}$ , вычисленное по всем полученным численным значениям объемной активности, составило 21 и 5.5 Бк/м<sup>3</sup> для атмосферного и почвенного воздуха соответственно.

Анализ всех полученных данных позволил предположить, что на всех участках исследования существует одновременно несколько источников поступления  $T_{\text{газ}}$  в воздушную среду. Это может быть почва, донные отложения и растительность, которые способны хорошо аккумулировать  $T$  в различных формах нахождения.

Порталы штолен на площадке “Дегелен” в основном представляют собой каменистые насыпи. Таким образом, одним из источников поступления  $T_{\text{газ}}$  в воздушную среду на данной территории могут являться и сами полости ПЯВ.

На “Атомном озере” наибольшее содержание  $T_{\text{газ}}$  отмечено на участках с высоким содержанием  $T$  в грунтах (табл. 6). Ранее установлено, что на гребне воронки численные количества  $T$  в почве, удельной активностью от 2000 до 6000 Бк/кг, фиксируются на глубине более 6 м [11]. Учитывая, что высота навала “Атомного озера” составляет порядка 30 м, абсолютное количество  $T$  в навале вокруг озера будет значительно превышать его содержание в поверхностном слое. В данном случае, вероятно, грунт является основным источником поступления  $T_{\text{газ}}$  в воздух.

На площадке “Опытное поле”, напротив, при достаточно высоком содержании  $T$  в почве, содержание  $T_{\text{газ}}$  находилось на максимально низком уровне либо ниже предела обнаружения. Анализ полученных данных показал, что в данном случае отбор проб воздуха проводился ранней весной либо осенью. Это привело к предположению, что процессы перераспределения  $T_{\text{газ}}$  в воздух неразрывно связаны с биологическими процессами, которые в указанные промежутки времени замедлены. Теоретически это могло повлиять на получение подобного рода результатов. Сделан вывод, что концентрация  $T_{\text{газ}}$  в воздухе на одном и том же участке исследований может иметь сезонную зависимость, что важно учесть при проведении подобного рода исследований. Данному вопросу необходимо посвятить отдельные исследования, направленные на изучение динамики содержания  $T_{\text{газ}}$  в воздушной среде СИП.

Вероятнее всего, образование  $T_{\text{газ}}$  и поступление его в воздух на территории полигона в первую

очередь будут зависеть от наличия в почве растительно-животной органической массы, содержащей  $T$ . В этом случае процесс расщепления сложных органических веществ, содержащихся в почве, до более простых, способных к эманации, происходит с образованием летучих газообразных соединений, которые в числе прочего будут содержать газообразные соединения  $T$ .

Учитывая специфику полигона, немаловажную роль в процессах образования  $T_{\text{газ}}$  и его поступления в воздух будет играть характеристика проведенного ядерного испытания. Так, например, проведенные ранее исследования показали, что механизмы образования, уровень содержания и формы нахождения  $T$  в почве существенно зависят от вида взрыва [2, 11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории СИП в местах проведения ядерных испытаний, несмотря на длительное время, прошедшее с момента проведения последнего взрыва, протекают процессы эманации  $T_{\text{газ}}$ . На сегодняшний день максимальные значения  $T_{\text{газ}}$  в воздушной среде, зафиксированные на территории полигона, составляют порядка 10% от значения ДОО<sub>нас.</sub>, равного 1900 Бк/м<sup>3</sup>. Данный вклад нельзя недооценивать и при проведении оценки тритиевого загрязнения воздушной среды на СИП, а возможно и на других радиоактивно-загрязненных территориях, необходимо учитывать не только содержание НТО, но и содержание  $T_{\text{газ}}$  в воздухе. Это позволит провести более корректную оценку территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению и устанавливать участки для проведения дальнейшего радиационного контроля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ляхова О.Н. Исследование уровня и характера распределения трития в воздушной среде на территории СИП: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2013. [*Lyakhova O.N. Issledovanie urovnya i haraktera raspredeleniya Tritiya v vozduшной srede na territorii SIP: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Obninsk, 2013. (In Russian)*]
2. Тимонова Л.В., Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Айдарханов А.О. Исследование содержания трития в почве в местах проведения ядерных испытаний на территории Семипалатинского испытательного полигона // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55. № 6. С. 667–672. [*Timonova L.V., Lyakhova O.N., Lukashenko S.N. i dr. Issledovanie soderzhaniya Tritiya v pochve v mestah provedeniya yadernykh ispytaniy na territorii Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona // Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya. 2015. V. 55. № 6. S. 667–672. (In Russian)*]
3. Машков А.С., Субботин С.Б., Лукашенко С.Н. Характер и уровни радионуклидного загрязнения



- площадки “Опытное поле” Семипалатинского испытательного полигона // Сб. тр. Института радиационной безопасности и экологии за 2010 г. / Под рук. С.Н. Лукашенко. Вып. 3. Павлодар: Дом печати, 2011. С. 13–80. [Mashkov A.S., Subbotin S.B., Lukashenko S.N. Charakter i urovni radionuklidnogo zagryazneniya ploshchadki Opytnoe pole Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona // Sb. tr. Institute radiacionnoj bezopasnosti i ekologii za 2010 g. / Pod ruk. S.N. Lukashenko. Vyp. 3. Pavlodar: Dom pečhati, 2011. S. 13–80. (In Russian)]
4. Умаров М.А., Лукашенко С.Н., Машиков А.С. и др. Исследование площадного распределения радиоактивного загрязнения испытательной площадки “Опытное поле” (2012–2014 гг.) // Вестн. НЯЦ РК. 2016. Вып. 1. С. 142–149. [Umarov M.A., Lukashenko S.N., Mashkov A.S. i dr. Issledovanie ploshchadnogo raspredeleniya radioaktivnogo zagryazneniya ispytatelnoj ploshchadki Opytnoe pole 2012–2014 g. // Vestnik NYAC RK. Vyp. 1. S. 142–149. (In Russian)]
  5. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N. Nature of radioactive contamination of components of ecosystems of streamflows from tunnels of Degelen massif A.V. Panitskiy // J. Environ. Radioact. 2015. V. 144. P. 32–40.
  6. Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Айдарханов А.О. Выявление основных источников поступления трития в атмосферный воздух и оценка уровня загрязнения тритием воздушной среды горного массива Дегелен // Пробл. биогеохимии и геохимической экологии. 2010. № 3 (14). С. 73–82. [Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Aidarkhanov A.O. Vyuavlenie osnovnyh istochnikov postupleniya tritiya v atmosfernyj vozduh i ocenka urovnya zagryazneniya tritиеm vozduшной sredy gornogo massiva Degelen // Problemy biogeohimii i geohimicheskoy ekologii. 2010. № 3 (14). S. 73–82. (In Russian)]
  7. Субботин С.Б., Лукашенко С.Н., Романенко В.В. и др. Выявление путей миграции техногенных радионуклидов за пределы площадки “Балапан” // Сб. тр. Института радиационной безопасности и экологии за 2010 г. / Под рук. С.Н. Лукашенко. Вып. 3. Павлодар: Дом печати, 2011. С. 161–232 [Subbotin S.B., Lukashenko S.N., Romanenko V.V. i dr. Vyuavlenie putej migracii tekhnogennyh radionuklidov za predely ploshchadki Balapan // Sb. tr. Institute radiacionnoj bezopasnosti i ekologii za 2010 g. / Pod ruk. S.N. Lukashenko. Vyp. 3. Pavlodar: Dom pečhati, 2011. S. 161–232. (In Russian)]
  8. Субботин С.Б., Лукашенко С.Н. Оценка возможности последствий катастрофического характера на территории площадки “Балапан” // Сб. тр. Института радиационной безопасности и экологии за 2007–2009 гг. / Под рук. С.Н. Лукашенко. Вып. 2. Павлодар: Дом печати, 2010. С. 401–450. [Subbotin S.B., Lukashenko S.N. Ocenka vozmozhnosti posledstvij katastroficheskogo haraktera na territorii ploshchadki Balapan. // Sb. tr. Instituta radiacionnoj bezopasnosti i ekologii za 2007–2009 gg. / Pod ruk. S.N. Lukashenko. Vyp. 2. Pavlodar: Dom pečhati, 2010. S. 401–450. (In Russian)]
  9. Субботин С.Б., Стрильчук Ю.Г., Пестов Е.Ю. и др. Современное радиоэкологическое состояние окружающей среды на испытательной площадке СИП “Сары-Узень” // Сб. тр. Института радиационной безопасности и экологии за 2011–2012 гг. / Под рук. С.Н. Лукашенко. Т. 1. Вып. 4. Павлодар: Дом печати, 2013. С. 117–186 [Subbotin S.B., Strilchuk Yu.G., Pestov E.Yu. i dr. Sovremennoe radioekologicheskoe sostoyanie okruzhayushchej sredy na ispytatelnoj ploshchadke SIP Sary-Uzen // Sb. tr. Instituta radiacionnoj bezopasnosti i ekologii za 2011–2012 gg. / Pod ruk. S.N. Lukashenko. T. 1. Vyp. 4. Pavlodar: Dom pečhati, 2013. S. 117–186. (In Russian)]
  10. Обеспечение радиационной безопасности на территории Республики Казахстан. Мероприятия 1. Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона: отчет РБП 038 (информационный, годовой) // ИРБЭ НЯЦ РК. / Под рук. Лукашенко С.Н. Курчатова: ИРБЭ НЯЦ РК, 2016. [Obespechenie radiacionnoj bezopasnosti na territorii respubliky Kazakhstan. Meropriyatiya 1. Obespechenie bezopasnosti byvshego Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona: otchet RBP 038 (informacionnyj, godovoj) // IRBE NYAC RK. / Pod ruk. Lukashenko S.N. Kurchatov: IRBE NYAC RK, 2016. (In Russian)]
  11. Сержанова З.Б., Айдарханова А.К. и др. Оценка распределения форм нахождения трития в грунтах радиационно-опасных объектов Семипалатинского полигона // Мат. V Междунар. Конф. “Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека”. Томск, 2016. С. 587. [Serzhanova Z.B. Aidarkhanova A.K. i dr. Ocenka raspredeleniya form nakhozhdeniya tritiya v gruntah radiacionno-opasnyh obektov Semipalatinskogo poligona // Materialy V mezhdunarodnoj konferencii radioaktivnost i radioaktivnye elementi v srede obitaniya cheloveka. Tomsk, 2016. S. 587. (In Russian)]
  12. Raimkanova A.M. Research of impact of various factors on processes of leaching radionuclides out of the soil / A.M. Raimkanova, A.K. Aidarkhanova, S.N. Lukashenko // Proceedings of the VII International scientific and practical conference “Semipalatinsk test site. Radiation legacy and development prospects”, 21–23 September 2016. Pavlodar: Publishing house 2016. P. 80.
  13. Айдарханов А.О., Субботин С.Б., Лукашенко С.Н. и др. Радиоактивное загрязнение техногенными радионуклидами компонентов экосистемы реки Шаган // Пробл. биогеохимии и геохимической экологии. 2010. № 3 (14). С. 106–114. [Aidarkhanov A.O., Subbotin S.B., Lukashenko S.N., Ajdarhanov A.O., Lariovova N.V. Radioaktivnoe zagryaznenie tekhnogennymi radionuklidami komponentov ekosistemy reki Shagan // Problemy biogeohimii i geohimicheskoy ekologii. 2010. № 3. (14). S. 106–114. (In Russian)]
  14. Разработка современных методов определения содержания некоторых дозообразующих радионуклидов (<sup>14</sup>C, <sup>151</sup>Sm, <sup>3</sup>H, <sup>99</sup>Tc) в объектах окружающей среды, технологических продуктах, выбросах и сбросах объектов ядерно-энергетической отрасли: Отчет о НИР (промежуточный) за 2013 г. / Под рук. Лукашенко С.Н., Сальменбаев С.Е. Курчатова: ИРБЭ НЯЦ РК, 2013. 56 с. № ГР0112 РК02597. Инв. № 0213РК03165. [Razrabotka sovremennyh metodov opredeleniya sodержaniya nekotoryh dozoobrazuyushchih radionuklidov (<sup>14</sup>C, <sup>151</sup>Sm, <sup>3</sup>H, <sup>99</sup>Tc) v obektah okruzhayushchej sredy, tekhnologicheskikh produktah, vybrsoakh i sbrosoakh obektov yadernо-energeticheskoy otrasli: Otchet o NIR (promezhutочный) za 2013 g. / Pod ruk. Lukashenko S.N., Salsmenbaev S.E. Kurchatov: IRBE NYAC RK, 2013. 56 s. № ГР0112 РК02597. Инв. № 0213РК03165. (In Russian)]

- tah, vybrosah i sbrosah obektov yaderno-energeticheskoy otrasli: Otchet o NIR (promezhutochnyj) za 2013 g. / Pod ruk. Lukashenko S.N., Salmenbaev S.E. Kurchatov: IRBE NYAC RK, 2013. 56 s. № GR 0112 RK02597. Inv. № 0213RK03165. (In Russian)]
15. ISO 9698:1989: Качество воды – метод сцинтилляционного счета. Международный стандарт ISO 9698:1989 (E). Введ. 1989-12-01. М.: ВЦП НТЛИД, 1990. 17 с. Инв. № Т-1008 [ISO 9698:1989: Kachestvo vody metod scintillyacionnogo scheta mezhdunarodnyj standart ISO 9698:1989 (E). Vved. 1989-12-01. М.: VCP NTLID, 1990. 17 s. Inv. № Т-1008. (In Russian)]
  16. Методы измерения трития: Рекомендации Нац. ком. по радиац. защите и измерениям (НКРЗ) США / Под ред. Ю.В. Сивинцева: Пер. с англ. М.И. Рохлина и Г.М. Рохлина. М.: Атомиздат, 1978. 94 с. [Metody izmereniya tritiya: rekomendacii Nac. kom. po radiac. zashchite i izmereniyam (NKRZ) SSHA / Pod red. Yu.V. Svinceva: Perevod s angl. M.I. Rohlina i G.M. Rohlina. М.: Atomizdat, 1978, 94 s. (In Russian)]
  17. Обеспечение радиационной безопасности на территории Республики Казахстан. Мероприятия 1. Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона: Отчет РБП 038 (информационный, годовой) / Рук. Лукашенко С.Н. Курчатov: ИРБЭ НЯЦ РК, 2014. [Obespechenie radiacionnoj bezopasnosti na territorii respubliky Kazahstan. Meropriyatiya 1. Obespechenie bezopasnosti byvshego Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona: Otchet RBP 038 (informacionnyj, godovoj) / Ruk. Lukashenko S.N. Kurchatov: IRBE NYAC RK, 2014. (In Russian)]
  18. Обеспечение радиационной безопасности на территории Республики Казахстан. Мероприятия 1. Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона: Отчет РБП 038 (информационный, годовой) / Рук. Лукашенко С.Н. Курчатov: ИРБЭ НЯЦ РК, 2016. [Obespechenie radiacionnoj bezopasnosti na territorii respubliky Kazahstan. Meropriyatiya 1. Obespechenie bezopasnosti byvshego Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona: Otchet RBP 038 (informacionnyj, godovoj) / Ruk. Lukashenko S.N. Kurchatov: IRBE NYAC RK, 2016. (In Russian)]

## Evaluation of the Concentration of Gaseous Compound of Tritium in Places of Nuclear Tests at the Semipalatinsk Test Site

**O. N. Lyakhova<sup>a, #</sup>, S. N. Lukashenko<sup>a</sup>, L. V. Timonova<sup>a</sup>, N.V. Larionova<sup>a</sup>, and D. V. Turchenko<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> Branch “Institute of Radiation Safety and Ecology” of the Republican State Enterprise of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

<sup>#</sup>E-mail: Lyakhova@nnc.kz

The article considers issues related to the specifics of tritium (T) entering to the atmosphere at the territory of the Semipalatinsk test site (SIP). The studies were performed at places of nuclear tests conducting. It has been established that T in the air of STS is present as 2 forms – oxidized, as the tritiated water (HTO) and gaseous, as organic volatile compounds (Tgas). The lowest concentration of T in the air was noted at the “Experimental field” in places of ground and air explosions. The sites with a maximum concentration of T in the air are located on the “Balapan” site where underground nuclear tests had been conducted. It was shown that the specific activity of T in the surface soil layer in a number of research areas ranged from hundreds to tens of thousands Bq/kg. According to this, it has been suggested that soil can be considered as an important source of Tgas input in atmosphere.

**Keywords:** Air, tritium, places of nuclear test conducting, oxidized tritium compounds, gaseous tritium compounds