

УДК 539.16, 614.876, 504.05

## О НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРНЫХ ПАРАМЕТРАХ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ БЫВШЕГО СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Каширский В. В. (kashirskiy@nnc.kz), Романенко Е. В. (pinchukova@nnc.kz),  
Зверева И. О. (zvereva@nnc.kz) (ИРБЭ НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан),  
Лукашенко С. Н., д. б. н. (lukashenko.1962@mail.ru) (ФГБНУ ВНИИРАЭ, г. Обнинск)

*В статье представлены обобщенные результаты комплексных экологических исследований «Северной», «Западной» и «Юго-Восточной» частей территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона. На их основе введено понятие фоновых территорий полигона, которые характеризуются определенным набором параметров радионуклидного загрязнения. Проведена сравнительная оценка радиационных параметров фоновых территорий Семипалатинского полигона с прочими территориями в глобальном масштабе. Введено понятие базовых параметров, характеризующих радионуклидное загрязнение фоновых территорий полигона. Приведены зависимости средней удельной активности изотопов плутония от средней удельной активности  $^{241}\text{Am}$ . Показана возможность при оценке активности изотопов плутония использовать средние значения изотопных отношений  $^{239+240}\text{Pu} / ^{241}\text{Am}$  и  $^{238}\text{Pu} / ^{241}\text{Am}$ . Описана технология применения метода базовых параметров для выявления фоновых территорий.*

► **Ключевые слова:** ядерные испытания, удельная концентрация, радионуклиды, базовые параметры, глобальные выпадения.

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.93.3.002

## ON SOME TYPICAL PARAMETERS OF RADIOACTIVE CONTAMINATION AT FORMER SEMIPALATINSK TEST SITE

Kashirskiy V. V., Romanenko E. V.,  
Zvereva I. O. (IRSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan),  
Lukashenko S. N., Ph. D. (Biology) (FSBSI ARRIRAE, Obninsk)

*The paper provides summary results of comprehensive ecological studies of Northern, Western and Southeastern parts of former Semipalatinsk Test Site area. Based on the results the concept of background territories of the test site, typically having a certain set of parameters of radioactive contamination, was introduced. Comparative assessment of radiation parameters of background territories of Semipalatinsk Test Site and other territories on a global basis was made. A concept of basic parameters, defining radioactive contamination of the test site background territories was introduced. Average specific activity of plutonium isotopes on average  $^{241}\text{Am}$  specific activity dependence values are given. Possibility of using average  $^{239+240}\text{Pu} / ^{241}\text{Am}$  and  $^{238}\text{Pu} / ^{241}\text{Am}$  isotopic ratio values in assessment of plutonium isotopes activity was shown. A technology of application of the method of basic parameters for identification of background territories was described.*

► **Keywords:** nuclear tests, specific concentration, radionuclides, basic parameters, global fallouts.

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.93.3.002

## Введение

Семипалатинский испытательный ядерный полигон (СИП) был одним из основных полигонов, использовавшихся бывшим Советским Союзом для испытаний ядерного оружия. На площади 18 400 км<sup>2</sup> с 1949 по 1989 гг. было проведено 456 ядерных испытаний, что составляет 64 % от всех испытаний в СССР. Загрязнение поверхностного покрова почвы территории СИП обусловлено в основном испытаниями на площадке «Опытное поле», где было проведено 30 наземных, 86 воздушных ядерных взрывов и 40 гидроядерных испытаний. По некоторым оценкам общая площадь территорий, оказавшихся под влиянием СИП, составляет около 304 000 км<sup>2</sup>.

После закрытия СИП его территория начала использоваться для ведения хозяйственной деятельности. Это обстоятельство явилось причиной проведения интенсивных исследований характера и уровня загрязнений территории полигона. На данный момент детально обследовано около 6 000 км<sup>2</sup> территории полигона. Проведен анализ содержания основных естественных (<sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th) и искусственных (<sup>137</sup>Cs, <sup>238</sup>Pu, <sup>239+240</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu, <sup>241</sup>Am) элементов в более чем 7 300 пробах почвы. На исследования затрачено порядка 20 млн. долларов США, то есть проведение подобных исследований является очень затратным. Причем одной из основных статей затрат является радиохимический анализ изотопов плутония. В мировой практике при обследовании радиоактивно загрязненных территорий широко применяют метод радионуклидных соотношений. Этот метод хорошо зарекомендовал себя при исследовании территорий, загрязнение которых имело один источник (ВУРС – 1957 г., авария на Чернобыльской АЭС – 1986 г., авария на АЭС Фукусима-1 – 2011 г.) [1 – 2]. Однако особенностью территории СИП является то, что вклад в радиоактивное загрязнение территории полигона привнесли более сотни источников, существенно различных как по изотопному, так и по радионуклидному составу. Традиционно считалось, что соотношения радионуклидов могут быть постоянными только на локальных участках загрязнения.

Целью представленной работы является обобщение всего накопленного материала и оптимизация методологии проведения оценки уровней загрязнения территории СИП.

## 1. Оценка некоторых параметров радионуклидного загрязнения исследованных территорий

### 1.1. Объекты обследования

До 2012 г. были проведены развернутые исследования «Северной» (3 000 км<sup>2</sup>), «Западной» (560 км<sup>2</sup>) и «Юго-Восточной» (850 км<sup>2</sup>) частей территории полигона [3 – 5]. Географическое положение данных территорий представлено на рис. 1.

Непосредственно на обследованных территориях СИП не проводилось каких-либо ядерных испытаний, их загрязнение может быть обусловлено только местными и глобальными выпадениями. Данные территории располагаются в географически разных частях полигона и, соответственно, на существенном расстоянии от основного источника поверхностного загрязнения – испытательной площадки «Опытное поле».

Данные территории были обследованы с использованием одной и той же аппаратурно-методической базы, одним и тем же персоналом, что дает основание считать случайную ошибку минимальной.

### 1.2. Средние концентрации искусственных радионуклидов в почве обследованных территорий

Данные, полученные в результате обследования, были проанализированы методами математической статистики. В результате были определены средние концентрации (удельные активности) основных искусственных радионуклидов на исследуемых территориях. Расчет проводился следующим образом:

- расчет статистических параметров: объем распределения (количество данных), средняя арифметическая, среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации и др.;

- определение выбросов (аномально высоких значений) и исключение их из общего массива данных. Для определения выбросов использовалось нормированное отклонение – показатель ценности измерения по отношению к общему массиву данных [6]. После исключения выбросов повторялся первый этап.

Результаты расчетов характерных параметров загрязнения обследованных территорий искусственными радионуклидами приведены в табл. 1.

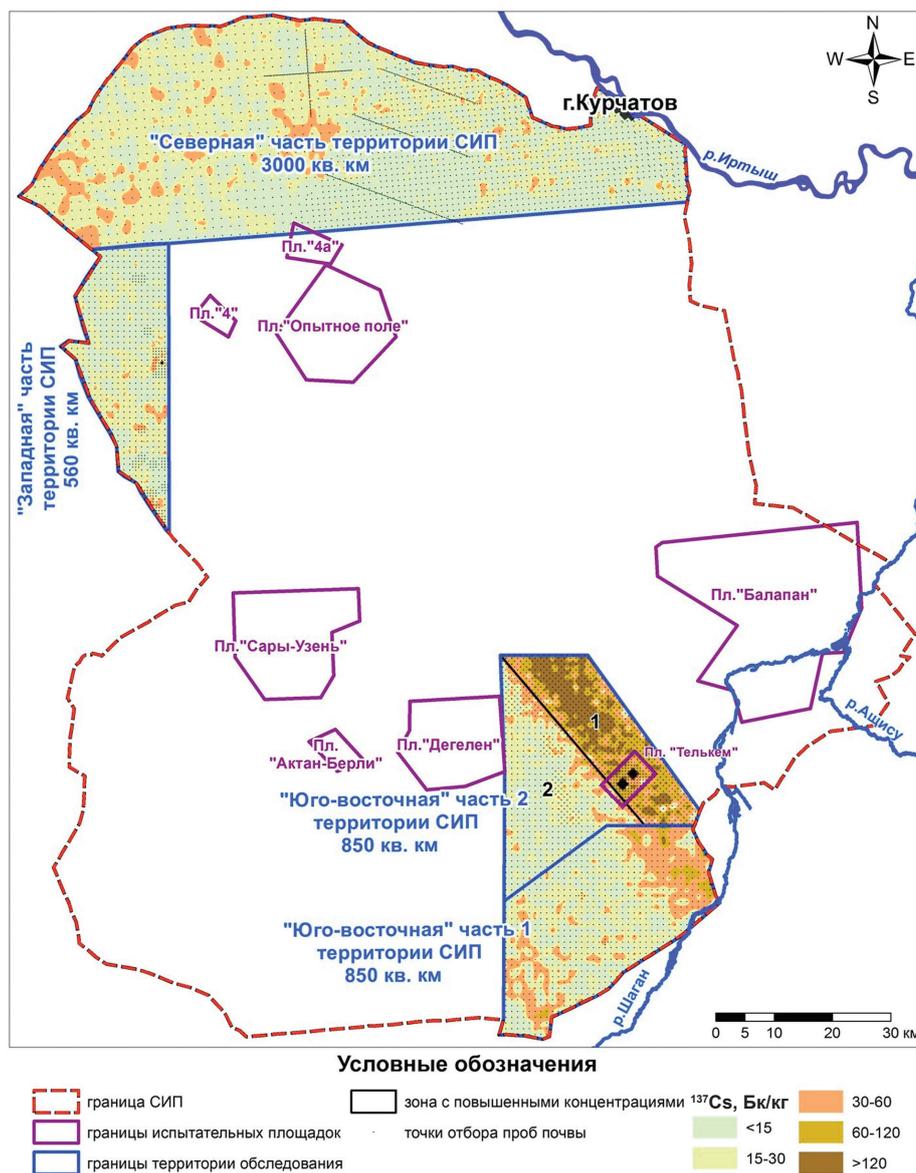


Рис. 1. Обследованные территории

Таблица 1

**Параметры загрязнения искусственными радионуклидами исследуемых территорий**

| Территория                  | <sup>137</sup> Cs, Бк/кг | <sup>241</sup> Am, Бк/кг | <sup>239+240</sup> Pu, Бк/кг | <sup>238</sup> Pu, Бк/кг         |                                  |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| «Северная часть» СИП        | 17,2                     | 0,8                      | 5,1 × <sup>241</sup> Am      | 0,14 + 0,081 × <sup>241</sup> Am |                                  |
| «Западная часть» СИП        | 16,7                     | 0,9                      | 5,4 × <sup>241</sup> Am      | 0,24 + 0,038 × <sup>241</sup> Am |                                  |
| «Юго-Восточная часть-1» СИП | зона 1                   | 43,9                     | 0,8                          | 17,9 × <sup>241</sup> Am         | 0,17 + 0,197 × <sup>241</sup> Am |
|                             | зона 2                   | 30,2                     | 0,8                          | 7,0 × <sup>241</sup> Am          | 0,16 + 0,266 × <sup>241</sup> Am |
|                             | зона 3                   | 19,0                     | 0,7                          | 5,1 × <sup>241</sup> Am          | 0,3 + 0,031 × <sup>241</sup> Am  |

При проведении обследования «Юго-Восточной» части-1 территории СИП в результате анализа данных площадного распределения радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  были выделены 3 зоны с разной структурой и уровнем радиоактивного загрязнения, предположительно сформированные различными источниками. При выделении зон принималось во внимание соответствие участков территории повышенных значений удельной активности радионуклидов с участками возможного прохождения радиоактивных облаков (гидроядерные и термоядерное испытания). В распределении радионуклидов были выделены две зоны (1 и 2), где зарегистрированы повышенные значения их удельной активности в почвенном покрове, и зона с относительно низкими значениями (3). Зона 1 – участок, соответствующий термоядерному следу радиоактивных выпадений 12.08.1953. В дальнейших расчетах базовых параметров использовались данные только по зоне 3 [3 – 5].

Более двух третей результатов определения  $^{241}\text{Am}$  на исследуемых территориях находятся ниже предела обнаружения используемой методики. Для того чтобы не потерять эту часть данных в дальнейшей обработке, за численное значение удельной активности принимался предел обнаружения, соответственно, среднее значение удельной активности  $^{241}\text{Am}$  следует рассматривать как оценку сверху.

Анализ результатов показывает, что ряд территорий СИП («Северная», «Западная», «Юго-Восточная» часть-1) характеризуется практически

одинаковым набором параметров (средние концентрации  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ), причем это именно те территории, которые не подверглись явному влиянию действия полигона. То есть на данных территориях не проводились ядерные испытания и при их обследовании не обнаружены явные следы от прохождения радиоактивных облаков. Таким образом, возникают предположения, что часть территорий полигона можно отнести к фоновым, и что фоновые территории будут характеризоваться одним набором параметров радионуклидного загрязнения. Для определения характерного набора параметров радионуклидного загрязнения все выбранные в ходе анализа данные были объединены, и в дальнейшей обработке участвовал весь массив данных по выбранным территориям.

## 2. Расчет основных параметров радионуклидного загрязнения фоновых территорий

### 2.1. Средняя удельная активность $^{241}\text{Am}$ и $^{137}\text{Cs}$

Распределение удельной активности  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почве фоновых территорий по частоте встречаемости представлено на рис. 2.

Максимум встречаемости концентрации  $^{241}\text{Am}$  приходится на пробы с удельной активностью менее 1 Бк/кг, при среднем – 0,9 Бк/кг. Максимум встречаемости концентрации  $^{137}\text{Cs}$  приходится на пробы с удельной активностью от 10 до 20 Бк/кг, при среднем – 18 Бк/кг.

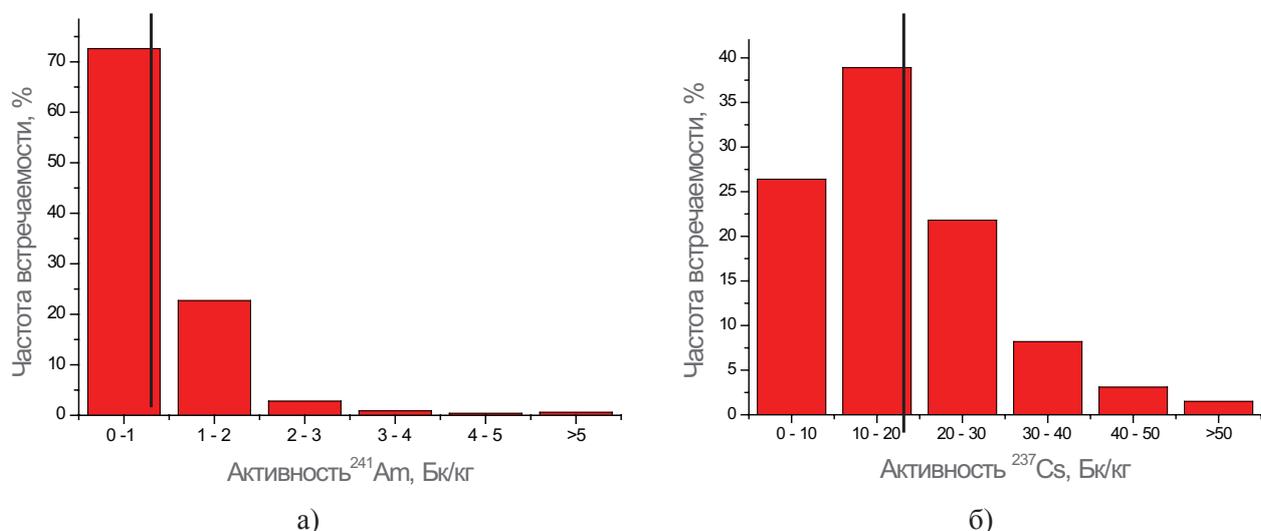


Рис. 2. Гистограмма распределения частоты встречаемости удельной активности в почве фоновых территорий: а)  $^{241}\text{Am}$ ; б)  $^{137}\text{Cs}$

**2.2. Среднее отношение  $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$  и  $^{238}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$**

Далее рассмотрим зависимости удельной активности изотопов плутония от удельной активности  $^{241}\text{Am}$ . График зависимости удельной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в почвах фоновых территорий приведен на рис. 3.

График на рис. 3 указывает на однозначную зависимость удельной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  от  $^{241}\text{Am}$  в почве фоновых территорий, среднее значение отношения удельной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  от  $^{241}\text{Am}$  равно 5,2. Коэффициент корреляции равен 0,64.

График зависимости удельной активности  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в почвах фоновых территорий приведен на рис. 4. Коэффициент корреляции равен 0,62.

При проведении статистической обработки результатов определения  $^{238}\text{Pu}$  от  $^{241}\text{Am}$  было выявлено, что активность  $^{238}\text{Pu}$  находится в однозначной зависимости от активности  $^{241}\text{Am}$ , но существует некоторая «добавка»  $^{238}\text{Pu}$ , не связанная с  $^{241}\text{Am}$ , а значит и не связанная с ядерными испытаниями. Для определения природы этой «добавки» были рассмотрены несколько механизмов ее появления.

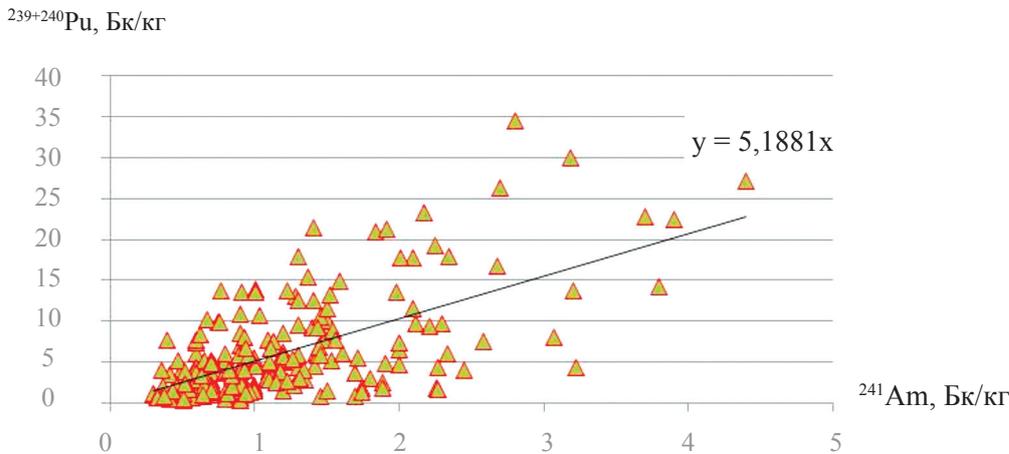


Рис. 3. График зависимости удельной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  от  $^{241}\text{Am}$  в почве фоновых территорий

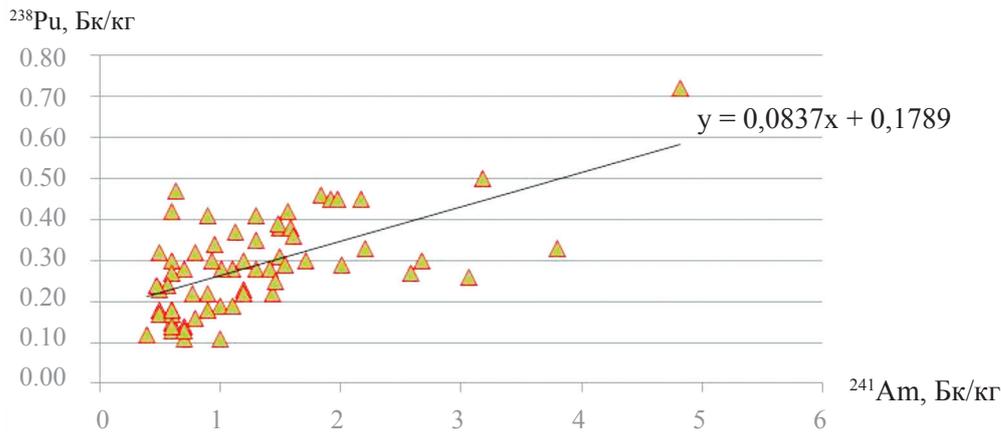


Рис. 4. График зависимости удельной активности  $^{238}\text{Pu}$  от  $^{241}\text{Am}$  в пробах почвы фоновых территорий

**2.2.1. Оценка влияния альфа-излучающих естественных радионуклидов ряда  $^{235, 238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$**

Для оценки возможного влияния естественных радионуклидов рядов  $^{235, 238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  на результаты определения  $^{238}\text{Pu}$  была взята серия навесок стандартов МАГАТЭ RGU-1 и RGTh-1. Навески RGU-1 содержали по 24,7 Бк  $^{238}\text{U}$  в естественном соотношении с  $^{235}\text{U}$ , навески RGTh-1 – по 16,25 Бк  $^{232}\text{Th}$ . Отобранные навески прошли стандартную радиохимическую процедуру анализа изотопов плутония. По полученным результатам определения  $^{238}\text{Pu}$  был рассчитан вклад радионуклидов рядов  $^{235, 238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в определяемую активность  $^{238}\text{Pu}$ . Вклад радионуклидов рядов  $^{235, 238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в определяемую активность  $^{238}\text{Pu}$  приведен в табл. 2.

В почвах, характерных для территории СИП, среднее естественное содержание  $^{238}\text{U}$  составляет

гетической установкой SNAP-9A на борту [7]. В результате этого инцидента в атмосферу земли было инжесктировано 950 г или 0,57 РБк  $^{238}\text{Pu}$ . Авария произошла над северным полушарием, обломки спутника упали в Индийский океан, но не указывается, в каком полушарии. Не было найдено информации и о том, в каком полушарии произошло разрушение энергетической установки SNAP-9A.

Для теоретической оценки добавки в глобальные выпадения от данного инцидента воспользуемся следующими исходными данными:

- весь  $^{238}\text{Pu}$  был распылен над Северным полушарием; учитывая период полураспада, получаем на 2012 г. 0,39 ПБк;
- площадь земной поверхности – 510 Тм<sup>2</sup>, соответственно, площадь Северного полушария 255 Тм<sup>2</sup>;

Таблица 2

**Вклад радионуклидов ряда  $^{235, 238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в определяемую активность  $^{238}\text{Pu}$**

| Вклад                      | $^{235, 238}\text{U}$ | $^{232}\text{Th}$ |
|----------------------------|-----------------------|-------------------|
| $^{238}\text{Pu}$ , Бк/обр | 0,0450 ± 0,0068       | 0,0150 ± 0,0023   |
|                            | 0,0303 ± 0,0045       | 0,0136 ± 0,0020   |
|                            | 0,0235 ± 0,0035       | 0,0289 ± 0,0043   |
|                            | 0,0071 ± 0,0011       | 0,0223 ± 0,0033   |
|                            | 0,0036 ± 0,0005       | 0,0230 ± 0,0035   |
| Среднее                    | 0,0169 ± 0,0033       | 0,0206 ± 0,0031   |

26 Бк/кг, а среднее естественное содержание  $^{232}\text{Th}$  составляет 29 Бк/кг. Отсюда следует, что при проведении стандартной процедуры определения изотопов плутония ошибка, связанная с недостаточной очисткой от естественных радионуклидов рядов  $^{235, 238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , составит для  $^{238}\text{Pu}$  0,055 Бк/кг. Все рассматриваемые результаты активности  $^{238}\text{Pu}$  в дальнейшем анализе были скорректированы на полученную величину. Таким образом, уравнение зависимости удельной активности  $^{238}\text{Pu}$  от  $^{241}\text{Am}$  в пробах почвы фоновых территорий имеет вид:

$$^{238}\text{Pu} \text{ (Бк/кг)} = 0,08 \times ^{241}\text{Am} \text{ (Бк/кг)} + 0,13 \text{ (Бк/кг)}. \quad (1)$$

**2.2.2. Оценка возможного вклада других источников  $^{238}\text{Pu}$  в загрязнение почвы**

При проведении литературного поиска возможных источников  $^{238}\text{Pu}$ , внесших вклад в загрязнение почвы в глобальном масштабе, были найдены материалы, свидетельствующие об аварии навигационного спутника «Транзит-5В» с ядерной энер-

- принимаем равномерное распределение радионуклидов по поверхности;
- глубина распределения радионуклидов в литосфере – 0,05 м;
- плотность почвы примем за 1500 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, удельная активность добавочного  $^{238}\text{Pu}$  глобальных выпадений в Северном полушарии будет равна:

$$A \text{ (Бк/кг)} = 0,39 \text{ (ПБк)} / 255 \text{ (Тм}^2\text{)} / 0,05 \text{ (м)} / 1500 \text{ (кг/м}^3\text{)} = 0,02. \quad (2)$$

В литературных источниках встречаются упоминания и о других инцидентах со спутниками, имеющими ядерные энергетические установки на борту. Однако никаких конкретных данных о них не приводится.

Полученное значение частично объясняет возникновение свободного члена в зависимости соотношений удельной активности  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в пробах почвы фоновых территорий, равного 0,13 Бк/кг.

### 3. Сравнительная оценка радиационных параметров фоновых территорий Семипалатинского испытательного полигона с прочими территориями

Ввиду того, что непосредственно на обследованных территориях бывшего СИП не проводилось каких-либо ядерных испытаний, и при их обследовании не обнаружены явные следы от прохождения радиоактивных облаков, источником их радионуклидного загрязнения могли быть только глобальные выпадения. В литературе приведено достаточно много данных по удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  глобальных выпадений. Диапазон концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ , обусловленных глобальными выпадениями в Северном полушарии, по литературным данным составляет: для  $^{137}\text{Cs}$  4 – 29, для  $^{239+240}\text{Pu}$  0,02 – 5,0 Бк/кг [8 – 15].

Подобных данных по удельной активности  $^{241}\text{Am}$  и  $^{238}\text{Pu}$  найдено не было, по-видимому, в силу сложности их спектрометрического определения на низких уровнях. Для сравнения данных, полученных при обследовании фоновых территорий с фоном глобальных выпадений, была сделана теоретическая оценка плотности глобальных выпадений по  $^{241}\text{Am}$  и  $^{238}\text{Pu}$  для Северного полушария.

$^{241}\text{Am}$  является продуктом распада  $^{241}\text{Pu}$ . Инъекция изотопов плутония в атмосферу обусловлена одним основным фактором – проведением наземных и воздушных ядерных испытаний. Чернобыльская авария, конечно, тоже внесла свой вклад, но величина этого вклада менее 10 %. В табл. 3 приводятся активности инжесктированных в атмосферу изотопов плутония для каждого механизма [7].

Для оценки плотности глобальных выпадений воспользуемся следующими исходными данными и предположениями:

- большая часть выпадений (~75 %), обусловленных ядерными испытаниями, приходится на северное полушарие;

- площадь земной поверхности – 510 Тм<sup>2</sup>;
- принимается, что радионуклиды распределены по поверхности земного шара равномерно;
- глубина распределения радионуклидов в литосфере – 0,05 м;
- плотность почвы – 1500 кг/м<sup>3</sup>.

Результаты теоретической оценки плотности глобальных выпадений с учетом распада на 2012 г. приведены в табл. 4.

Полученные данные по  $^{239+240}\text{Pu}$  хорошо соотносятся с диапазоном концентраций, приведенным в литературе. В действительности теоретически полученный диапазон концентраций необходимо расширить, так как в естественных ландшафтах радионуклиды мигрируют и со временем перераспределяются.

Безусловно, полученные результаты являются ориентировочными и могут использоваться только для приблизительного сравнения.

Таким образом, близость концентраций искусственных радионуклидов на исследуемых территориях и концентраций искусственных радионуклидов, характерных для глобальных выпадений, подтверждает первоначальный вывод о том, что единственным источником радионуклидного загрязнения обследованных территорий являются глобальные выпадения. Данный факт позволяет отнести эти территории к категории фоновых в мировом масштабе.

### 4. Метод базовых параметров

После анализа объединенных данных полученные средние значения удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  в почве фоновых территорий были определены как базовые параметры, характеризующие радионуклидное загрязнение фоновых территорий СИП (табл. 5). Приемлемый диапазон вариаций удельных активностей был определен в 10 %, с учетом того, что 10 % – это стандартная погрешность гамма-спектрометрического анализа.

Таблица 3

Активности инжесктированных в атмосферу изотопов плутония

| Радионуклид                | Ядерные испытания              | Чернобыльская авария           |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $^{238}\text{Pu}$ , Бк     | $(0,28 - 0,36) \times 10^{14}$ | $(0,25 - 0,35) \times 10^{13}$ |
| $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк | $(11 - 15) \times 10^{14}$     | $(0,55 - 0,72) \times 10^{13}$ |
| $^{241}\text{Pu}$ , Бк     | $(140 - 360) \times 10^{14}$   | $(5 - 6,2) \times 10^{14}$     |

Таблица 4

**Теоретически рассчитанный диапазон концентраций изотопов плутония и <sup>241</sup>Am, обусловленный глобальными выпадениями в Северном полушарии**

|                     |                   |                       |                   |                    |
|---------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|
| Радионуклид         | <sup>238</sup> Pu | <sup>239+240</sup> Pu | <sup>241</sup> Pu | <sup>241</sup> Am* |
| Концентрация, Бк/кг | 0,07 – 0,14       | 0,34 – 0,59           | 0,5 – 1,3         | 0,2 – 0,4          |

Примечание. \*Значения концентрации <sup>241</sup>Am получены исходя из расчета его накопления при распаде <sup>241</sup>Pu.

Таблица 5

**Базовые параметры, характеризующие фоновые территории Семипалатинского испытательного полигона**

| Базовые параметры для фоновых территорий |                   |
|--|-------------------|
| <sup>137</sup> Cs, Бк/кг                 | 16 – 20 (18)      |
| <sup>241</sup> Am, Бк/кг                 | < 0,8 – 1,0 (0,9) |

При соблюдении данных параметров удельная активность изотопов плутония на исследуемой территории будет находиться в однозначной зависимости от удельной активности <sup>241</sup>Am. Иначе можно сформулировать метод базовых параметров (МБП) так, как это представлено в табл. 6.

На данном этапе необходимо отметить, что среднее значение удельной активности <sup>241</sup>Am является оценкой сверху. Данный факт говорит о том, что нижний предел диапазона концентраций <sup>241</sup>Am

и <sup>241</sup>Am (рис. 5). По картам видно, что исследуемая территория состоит из двух зон загрязнения. Было проведено визуальное разделение зон. Зону 1 отнесли к условно «грязной», а зону 2 – к условно «чистой» территории.

Для каждой из зон были рассчитаны средние значения удельной активности <sup>137</sup>Cs и <sup>241</sup>Am. Средняя удельная активность <sup>137</sup>Cs и <sup>241</sup>Am в зоне загрязнения 1 составляет 111 Бк/кг и 1,6 Бк/кг, в зоне 2 – 21,6 Бк/кг и 1,1 Бк/кг, соответственно.

Таблица 6

**Метод базовых параметров**

| Если:                    |                          | То:                          |                                 |
|--------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| <sup>137</sup> Cs, Бк/кг | <sup>241</sup> Am, Бк/кг | <sup>239+240</sup> Pu, Бк/кг | <sup>238</sup> Pu, Бк/кг        |
| 16 – 20                  | < 0,8 – 1,0              | 5,2 × <sup>241</sup> Am      | 0,08 × <sup>241</sup> Am + 0,13 |

может быть сдвинут в сторону уменьшения удельной активности <sup>241</sup>Am. Иными словами, вероятнее всего, что МБП можно использовать и при средней удельной активности <sup>241</sup>Am меньше 0,8 Бк/кг.

**5. Применение метода базовых параметров**

В 2012 г. было закончено обследование радионуклидного загрязнения «Юго-Восточной» части-2. По результатам обследования были построены карты распределения удельных активностей <sup>137</sup>Cs

Для зоны 1 средние значения удельных активностей значительно превышают выбранные ранее базовые параметры, и расчет удельных активностей изотопов плутония предложенным методом невозможен.

Так как для зоны 2 данное превышение было незначительным, была сделана попытка применить МБП для оценки удельной активности изотопов плутония по МБП. Результаты оценки представлены в таблице 7 в сравнении с фактическими данными, полученными в ходе проведения обследования.

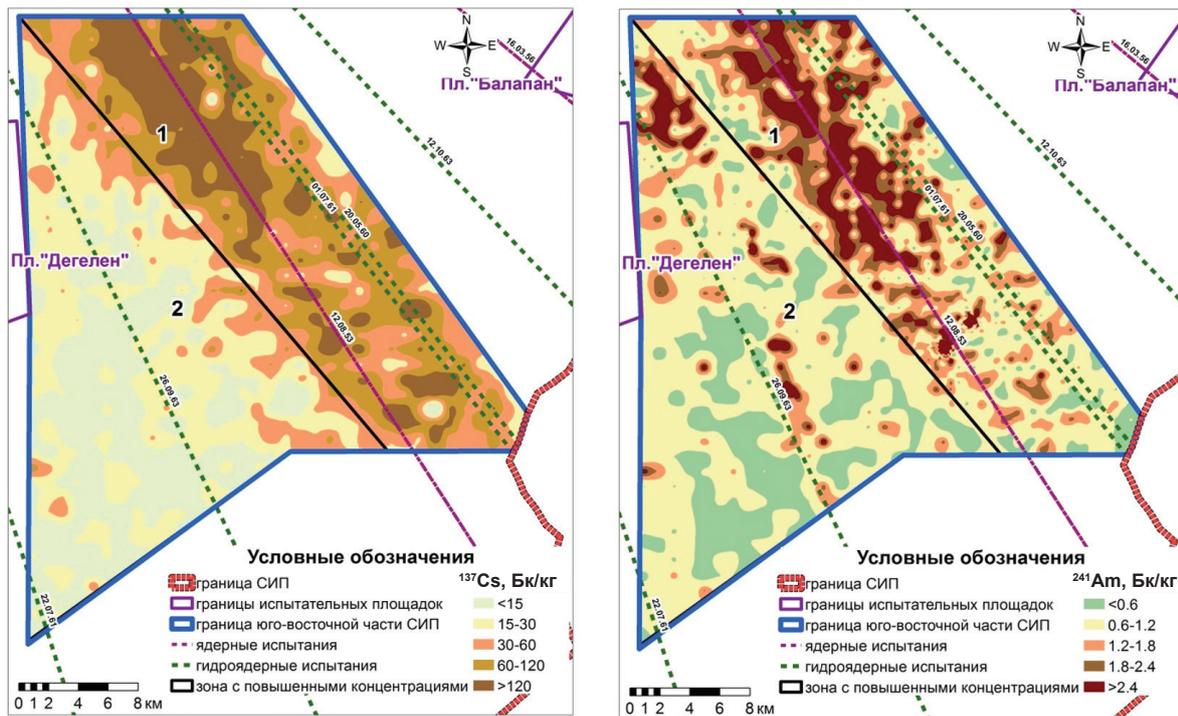


Рис. 5. Удельная активность <sup>137</sup>Cs и <sup>241</sup>Am в пробах почвы «Юго-Восточной» части-2

Таблица 7

**Результаты оценки активности изотопов плутония с использованием метода базовых параметров и данные, полученные в ходе проведения обследования**

| <sup>137</sup> Cs | <sup>241</sup> Am | <sup>239+240</sup> Pu, Бк/кг |             | <sup>238</sup> Pu, Бк/кг |             |
|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------|--------------------------|-------------|
|                   |                   | Расчетное                    | Фактическое | Расчетное                | Фактическое |
| 22                | 1,1               | 5,70                         | 23,0        | 0,22                     | 0,20        |
| Расхождение, %    |                   | 75                           |             | - 10                     |             |

Видно, что достоверность подобной оценки чрезвычайно низкая.

Далее, для того, чтобы средние значения удельной активности <sup>137</sup>Cs и <sup>241</sup>Am в зоне 2 стали удовлетворять условию МБП, правую границу зоны 2 сдвигали с шагом 0,5 км параллельно оси загрязнения в сторону более чистых территорий. Данный процесс был итерационным. Смещение границы производилось до тех пор, пока средние удельные активности <sup>137</sup>Cs и <sup>241</sup>Am в зоне 2 не стали удовлетворять условию МБП (рис. 6).

В табл. 8 представлены средние удельные активности <sup>137</sup>Cs и <sup>241</sup>Am в почве территории «Юго-Восточной» части – 2, зоны 2, после смещения границы.

После этого был вновь проведен расчет средних удельных активностей изотопов плутония для зоны 2 с оптимизированными границами. В табл. 9 представлены результаты применения МБП для оценки активности изотопов плутония в «Юго-Восточной части» – 2, зоне 2.

Таким образом, показана возможность использования МБП не только для оценки активности изотопов плутония, но и его применения для определения границ фоновых территорий. Точность оценки активности изотопов плутония с использованием МБП чрезвычайно высока и позволяет оптимизировать проведение комплексных экологических исследований и отказаться от проведения чрезвычайно дорогостоящих радиохимических анализов изотопов плутония, проводя их только для верификации полученных данных.

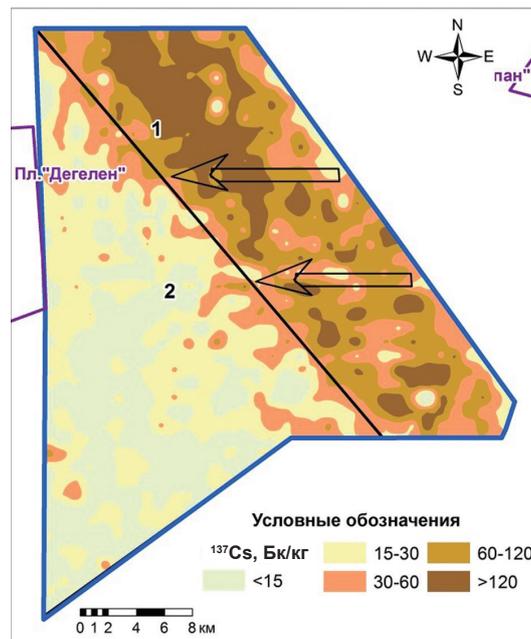


Рис. 6. Применение метода базовых параметров

Таблица 8

**Средние удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  в почве территории «Юго-Восточной» части – 2, зоны 2**

| Зона                              | $^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг | $^{241}\text{Am}$ , Бк/кг |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| «Юго-Восточная» часть – 2, зона 2 | 18,3                      | 1                         |
| Метод базовых параметров          | 16 – 20                   | 0,8 – 1,0                 |

Таблица 9

**Результаты оценки активности изотопов плутония с использованием метода базовых параметров для «Юго-Восточной» части – 2, зоны 2**

| $^{137}\text{Cs}$ | $^{241}\text{Am}$ | $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг |             | $^{238}\text{Pu}$ , Бк/кг |             |
|-------------------|-------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
|                   |                   | Расчетное                     | Фактическое | Расчетное                 | Фактическое |
| 18,3              | 1,0               | 5,20                          | 5,35        | 0,21                      | 0,20        |
| Расхождение, %    |                   | 2,8                           |             | – 5                       |             |

**Заключение**

Таким образом, можно сделать вывод, что существуют объективные предпосылки для введения понятия фоновых территорий СИП. Эти территории характеризуются следующими параметрами: среднее содержание  $^{137}\text{Cs}$  – 18 Бк/кг, среднее содержание  $^{241}\text{Am}$  – < 0,9 Бк/кг, среднее отношение  $^{239+240}\text{Pu} / ^{241}\text{Am}$  – 5,3. Можно говорить и о среднем отношении  $^{238}\text{Pu} / ^{241}\text{Am}$  для фоновых территорий, однако существует присутствие  $^{238}\text{Pu}$ , не связанного с проведением ядерных испытаний на СИП. В нашем случае

активность привнесенного  $^{238}\text{Pu}$  оценивается в 0,13 Бк/кг.

При исследовании фоновых территорий для оценки активности изотопов плутония возможно использование средних значений изотопных соотношений  $^{239+240}\text{Pu} / ^{241}\text{Am}$ , равного 5,3, и  $^{238}\text{Pu} / ^{241}\text{Am}$ , равного  $0,08 \times ^{241}\text{Am} + 0,13$ . Следовательно, принимая во внимание полученные данные, возможно на их основе оптимизировать проведение комплексных экологических исследований и отказаться от проведения чрезвычайно дорогостоящих радиохимических анализов изотопов плутония, проводя их только для заверки полученных данных.

## Список литературы

1. Determination and use of scaling factor for waste characterization in NPP: рекомендации МАГАТЭ, IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. – IAEA Vienna, Austria, 2009.
2. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по применению метода радионуклидных соотношений для определения содержания сложнодетектируемых радионуклидов в радиоактивных отходах предприятий ядерного топливного цикла. РБ-154-19: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 4 апреля 2019 г. № 137, введено в действие с 4 апреля 2019 г.
3. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Радиоэкологическое состояние «северной» части территории Семипалатинского испытательного полигона] / под рук. Лукашенко С. Н. – Вып. 1. – Павлодар: Дом печати, 2010. – ISBN 978-601-7112-28-8.
4. Стрильчук Ю. Г. Радиоэкологическое состояние «западной» части территории СИП / Ю. Г. Стрильчук, О. В. Тоневицкая, Ю. Ю. Яковенко // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2010 г.] / под рук. Лукашенко С. Н. – Т. 2. – Вып. 3. – Павлодар: Дом печати, 2011.
5. Обеспечение радиационной безопасности на территории Республики Казахстан: республиканская бюджетная программа 038. Отчет о РБП 038 (информационный по договору № 1/3 09.02.2011 / ИРБЭ НЯЦ РК, приложение «Радиоэкологическое состояние «юго-восточной» части территории СИП» // рук. Лукашенко С. Н. Курчатова, ИРБЭ НЯЦ РК, 2011.
6. Лакин Г. Ф. Биометрия. – М.: Высшая школа, 1990.
7. Ikäheimonen T. K. Determination of transuranic elements, their behaviour and sources in the aquatic environment. Academic dissertation / Tarja K. Ikäheimonen. – Helsinki, 2003.
8. Василенко И. Я. Чернобыль и проблемы радиобиологии // Природа. 2001. № 4.
9. Давыдов М. Г. Радиоэкология. Учебник. Избранные главы. – М.: Феникс. – 2013.
10. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации: доклад на Генеральной Ассамблее ООН за 1988 г. – М., 1992.
11. Павлоцкая Ф. И. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. – М.: Атомиздат. – 1974.
12. Марей А. Н., Бархударов Р. М., Новикова Н. Я. Глобальные выпадения цезия-137 и человек. – М.: Атомиздат. – 1974.
13. Моисеев А. А., Рамзаев П. В. Цезий-137 в биосфере. – М.: Атомиздат. – 1975.
14. Бонина Т. А., Хвалей О. Д., Журавков В. В. Анализ некоторых результатов долгосрочного радиоэкологического мониторинга территории Республики Беларусь // Вестник БГПУ. 2008. № 4.
15. Чернобыль. Радиоактивное загрязнение природных сред / под ред. Ю. А. Израэля. – М.: Гидрометеиздат. – 1990.

## References

1. Determination and use of scaling factor for waste characterization in NPP: IAEA Guidelines, IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. – IAEA Vienna, Austria, 2009.
2. Safety regulations in nuclear power industry. Recommendations for the application of the method of radionuclide ratios to determine the content of hard-to-detect radionuclides in radioactive waste of nuclear fuel cycle enterprises. RB-154-19: approved by Order No. 137 of the Federal Service for environmental, technological and nuclear supervision of April 4, 2019, effective since April 4, 2019.
3. Topical issues of radioecology of Kazakhstan [Radioecological status of the northern part of Semipalatinsk test site area] / ed. Lukashenko S. N. – Vol. 1. – Pavlodar: Press House, 2010. – ISBN 978-601-7112-28-8.
4. Strilchuk Yu. G. Radioecological status of the western part of Semipalatinsk test site area / Yu. G. Strilchuk, O. V. Tonevitskaya, Yakovenko Y. Y. // Actual problems of radioecology of Kazakhstan [Collection works of the National nuclear center of the Republic of Kazakhstan for 2010] / ed. Lukashenko S. N. – Vol. 2. – Vol. 3. – Pavlodar: Press House, 2011.
5. Ensuring radiation safety in the territory of the Republic of Kazakhstan: Republican budget program 038. Report on radiation safety of test site area 038 (information under contract No. 1/3 09.02.2011 / NNC KZ, Annex “Radioecological status of the south-eastern part of Semipalatinsk test site area” // ed. Lukashenko S. N., Kurchatov, NNC KZ, 2011.

6. Lakin G. F. Biometrics. – Moscow: Higher school, 1990.
7. Ikäheimonen T. K. Determination of transuranic elements, their behaviour and sources in the aquatic environment. Academic dissertation / Tarja K. Ikäheimonen. – Helsinki, 2003.
8. Vasilenko I. Ya. Chernobyl and problems of radiobiology // Nature. 2001. No. 4.
9. Davydov M. G. Radioecology. Textbook. Selected chapters. – M.: Phoenix. – 2013.
10. Sources, effects and hazards of ionizing radiation: Report to the UN General Assembly for 1988. – M., 1992.
11. Pavlotskaya F. I. Migration of radioactive products of global precipitation in soils. – M.: Atomizdat. – 1974.
12. Marey A. N., Barkhudarov R. M., Novikova N. Ya. Global precipitation of Cesium-137 and humans. – M.: Atomizdat. – 1974.
13. Moiseev A. A., Ramzaev P. V. Cesium-137 in the biosphere. – M.: Atomizdat. – 1975.
14. Bonina T. A., Khvaley O. D., Zhuravkov V. V. Analysis of some results of long-term radioecological monitoring of the territory of the Republic of Belarus. BSPU Vestnik, 2008. No. 4.
15. Chernobyl. Radioactive contamination of natural environments / ed. by Y. A. Izrael. – M.: Gidrometeoizdat. – 1990.

