

Уменьшение фона глобальных выпадений ^{137}Cs на инспектируемой территории как признак для поиска радиационной аномалии скрытого подземного взрыва или артефакта

© Ю. В. Дубасов^{*a}, С. С. Гаврилин^a, Л. И. Ильин^a

^a Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, 194021, Санкт-Петербург, 2-й Муринский пр., д. 28;
 * e-mail: dubasov@khlopin.ru

Получена 24.08.2018, после доработки 20.11.2018, принята к публикации 27.11.2018 УДК 623.454.84:546.36.02*137

Ранее было замечено, что после ядерных взрывов в некоторых вертикальных скважинах на Семипалатинском полигоне плотность загрязнения грунта ^{137}Cs заметно уменьшалась по сравнению с фоном глобальных выпадений ^{137}Cs . Наличие данного эффекта проверялось в 1997–1999 гг. вокруг 10 подготовленных для ядерных испытаний вертикальных скважин, а также 3 скважин после проведенных ядерных испытаний. При обследовании снимали γ -спектры с Ge(Li)- и NaI(Tl)-детекторами и отбирали пробы грунта. Исследования показали, что в радиусе около 100 м вокруг обследованных скважин поверхностная активность ^{137}Cs действительно уменьшилась. Это происходит вследствие выполнения большого объема работ при создании испытательной скважины, приведших к перемещению поверхностного покрова на площадке. Такой эффект может послужить дополнительным признаком для поиска необъявленного ядерного взрыва при проведении инспекции на месте.

Ключевые слова: уровень глобальных выпадений ^{137}Cs , бывший Семипалатинский полигон, площадка Балапан, мобильная γ -спектрометрическая лаборатория, инспекция на месте, Договор о запрещении ядерных испытаний.

DOI: 10.1134/S0033831119040129

Введение

Ранее в конце 1980-х гг. при подготовке Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) Радиевый институт разрабатывал одну из методик для проведения инспекции на месте (ИНМ) [1]. При обследовании одного из проведенных подземных ядерных взрывов (ПЯВ) в вертикальной скважине на испытательной площадке «Балапан» Семипалатинского полигона было замечено, что после этого взрыва плотность загрязнения грунта ^{137}Cs на технологической площадке заметно уменьшилась по сравнению с первоначальным уровнем регионального фона глобальных выпадений. Для обследования использовали автомобильный сцинтилляционный спектрометр «Нива-2». Как только спектрометр «Нива-2» покидал пределы технологической площадки, пик полного поглощения ^{137}Cs в специальном окне начинал увеличиваться, и наоборот, при возвращении на площадку этот фотопик заметно уменьшался.

В составе Семипалатинского полигона СССР имелась испытательная площадка «Балапан» для проведения подземных ядерных взрывов в вертикальных скважинах. На площадке «Балапан» общей площадью 780 км² было проведено 105 подземных ядерных испытаний. Обследования приусьтевых площадок скважин показали, что в большинстве случаев радиационные параметры не превышают допустимых значений для полигонов. Максимальные кон-

центрации радионуклидов наблюдаются у оголовков скважин. И только на приусьтевых площадках 10 скважин обнаружено радиоактивное загрязнение почвенного покрова. Обычно примерно в 40% случаев [2] после ПЯВ происходит слабое истечение газов и на поверхности технологической площадки могут выпадать дочерние продукты радионуклидов благородных газов Kr и Xe (РБГ). Состав дочерних радионуклидов (активный осадок) зависит от момента начала истечения газовой фазы из центральной зоны подземного взрыва, так как радионуклиды РБГ имеют различные периоды полураспада. Например, ^{137}Xe распадается в ^{137}Cs с $T_{1/2} = 3.8$ мин, а предшественник $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Kr}$ с $T_{1/2} = 32.3$ с.

В тех местах испытательной площадки «Балапан», где не происходило истечения РБГ, уровень регионального фона глобальных выпадений оставался прежним, соответствующим фону за пределами как испытательных площадок, так и самого Семипалатинского полигона. Поэтому обнаруженный нами эффект вызывал необходимость проверки и выяснения причин данного явления, а также установления закономерности этого с целью возможного применения в интересах ДВЗЯИ.

При проведении в конце 1990-х гг. работ по радиационному обследованию бывшего Семипалатинского полигона было решено проверить наличие данного эффекта на испытательной площадке Балапан данного полигона, на которой осталось 10 под-

готовленных, но не использованных для ядерных испытаний вертикальных скважин. Три из них были выбраны для проведения калибровочных взрывов с использованием обычных ВВ. Для выяснения влияния химического взрыва на изменение фона глобальных выпадений ^{137}Cs вблизи зарядной скважины в 1997 г. были определены параметры радиационного поля вокруг скважин NN 1311, 1349 и 1381 до начала проведения в них калибровочных взрывов [3].

Экспериментальная часть

Для исследований искомого эффекта использовался метод непосредственной γ -спектрометрии на местности (*in situ*). Гамма-спектрометрические измерения вокруг всех скважин проводили одновременно двумя спектрометрами с Ge(Li)-детекторами, установленными в выбранных для обследования точках по радиальным профилям. Оба детектора имели примерно равную расчетную для полевых условий чувствительность $\sim 80 \text{ mm}^2$ при относительной эффективности 15%. На каждой из технологических площадок обследуемых скважин было проведено по 6–8 измерений, длительность измерения составляла 30 мин. Крайние от скважины точки размещались по возможности за пределами инженерно-технической деятельности на участках с нетронутым травяным покровом [3, 4].

Затем в 1999 г. [5] проводили обследование технологических площадок скважин, в которых были проведены ядерные взрывы полного камуфлажа без истечения РБГ. Предварительный осмотр всех приусыревых площадок испытанных скважин показал, что по условиям рельефа площадок наиболее удобными для обследования являются площадки скважин NN 1350, 1365, 1410 и 1412. На этих площадках после взрыва практически не было остаточного поднятия грунта и радиационный фон практически не отличался от естественного для площадки Балапан. Для обследования были выбраны площадки трех следующих скважин: NN 1350 ($49^{\circ}52'43''$ с.ш., $78^{\circ}49'22''$ в.д.), 1365 ($49^{\circ}59'17''$ с.ш., $78^{\circ}54'10''$ в.д.) и 1412 ($50^{\circ}02'45''$ с.ш., $78^{\circ}58'05''$ в.д.). Вокруг каждой скважины проводили измерение мощности дозы и снятие γ -спектров с помощью Ge(Li)-спектрометров, устанавливаемых в 17 точках на площадке размером $200 \times 200 \text{ м}^2$, экспозиция съемки 30 мин; минимально-детектируемая поверхностная активность (МДПА) составляла $0.35 \text{ кБк}/\text{м}^2$. С помощью автомобильного γ -спектрометра «Нива-2» с 4 NaI(Tl)-детекторами объемом 3 л каждый на этих же технологических площадках, но с большим охватом обследования размером $400 \times 400 \text{ м}^2$ снимали спектры в 64 точках по восьми радиальным профилям, экспозиция в точке записи спектра была 10 мин, МДПА = $0.21 \text{ кБк}/\text{м}^2$. Поверхностную активность ^{137}Cs рассчитывали по подготовленной в Радиевом институте в 1996 г. методике вы-

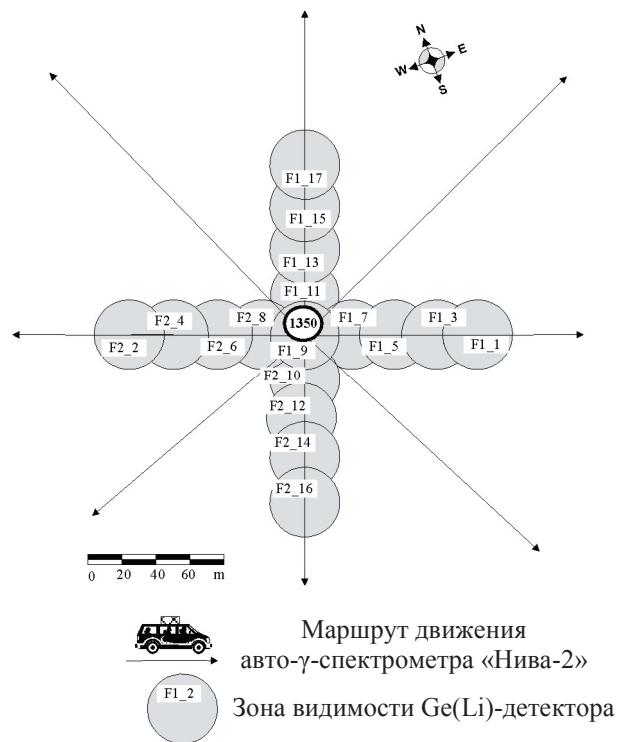


Рис. 1. Схема радиационного обследования технологической площадки скважины 1350. Типичная схема обследования.

полнения измерений МВИ и методике выполнения расчетов МВР для сертификации.

На рис. 1 показана типичная схема обследования на технологических площадках вокруг скважин.

На выбранных технологических площадках также отбирали послойные пробы грунта на глубину до 20 см (шаг 5 см), было отобрано 18 проб и несколько проб за пределами площадок. Лабораторные измерения проб показали, что в большинстве случаев закон распределения активности ^{137}Cs в грунте по глубине близок к экспоненциальному.

Средняя мощность дозы γ -излучения на обследованных площадках скважин была в интервале значений от 0.12 до 0.14 $\text{мкЗв}/\text{ч}$, а средняя плотность потока β -частиц – 11–26 частиц/($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$), что соответствовало фоновым уровням для территории площадки Балапан вне пределов испытательного поля.

Чувствительность сцинтиляционного спектрометра «Нива-2» позволяет измерять уровни загрязнения поверхности глобальными радиоактивными выпадениями ($\leq 0.05 \text{ Ки}/\text{км}^2 = 1.85 \text{ кБк}/\text{м}^2$ ^{137}Cs) при скорости движения автомобиля 10 км/ч. На обследуемой площади были проложены маршруты по прямоугольной сетке так, чтобы расстояние между ними было 30–50 м. Таким образом, вся обследуемая область была перекрыта измерениями сцинтиляционного спектрометра. Для детализации картины в регулярных точках, которые были выбраны на месте, проводили измерения с Ge(Li)-спектрометром.

Во всех точках обследования был виден фотопик ^{137}Cs небольшой интенсивности (на уровне региональных глобальных выпадений), обсчитываемый с относительной неопределенностью 3%. Для столь низких активностей (величины пика в спектре), как показали расчеты, характер распределения ^{137}Cs практически не влияет на конечный результат, однако было принято экспоненциальное распределение, как наиболее реальное для данной местности. Основными γ -излучателями в обследованных точках являются естественные радионуклиды ^{40}K , семейства ^{238}U , семейства ^{232}Th . При обработке результатов измерений грунт площадки моделировался диском с экспоненциальным распределением по глубине для ^{137}Cs и равномерным для естественных радионуклидов.

Максимум распределения ^{137}Cs даже в 2010 г. по-прежнему приходился на верхние слои почв Семипалатинского полигона, а удельная активность грунта в некоторых точках отбора менялась от 1 до 3 $\text{Бк}/\text{кг}$ [6].

Для нахождения коэффициентов перехода от скорости счета импульсов, зарегистрированных в пике полного поглощения, к параметрам распределения активности в источнике γ -излучения была проведена калибровка γ -спектрометров (с помощью точечных образцовых γ -источников). Основная неопределенность в вычислении поверхностной активности была обусловлена точностью модели распределения ^{137}Cs по глубине; общая неопределенность составила 20–25%.

Для упрощения задачи можно было бы сравнивать только количество импульсов, зарегистрированных в пике полного поглощения ^{137}Cs (662 кэВ) на площадках и за их пределами, но мы для большей наглядности вычисляли плотность загрязнения ^{137}Cs .

Результаты и обсуждение

В табл. 1–3 представлены результаты обследования технологических площадок скважин после проведения в них калибровочных взрывов с помощью обычных ВВ и для сравнения приведены результаты обследования этих же площадок в 1997 г.

Уровень фона ^{137}Cs на площадках скважин N 1311, 1349 и 1381 до проведения калибровочных взрывов в 1997 г. уже был ниже регионального уровня фона глобальных выпадений, так же как и на других подготовленных для испытаний скважинах. После уничтожения в результате калибровочных взрывов этих трех скважин наше обследование в 1998 г. показало, что фон по ^{137}Cs стал еще ниже.

При обследовании площадки скважины N 1349 спектрометры располагали на одной линии с оголовком скважины, расстояние между точками съемки было 30 м. При обследовании площадки скважины N 1381 спектрометры также располагали на удалении 30 м друг от друга, причем оголовок скважины находился между точками P1 и P2.

Таблица 1. Поверхностная активность ^{137}Cs ($\text{кБк}/\text{м}^2$) в точках наблюдения вокруг скважины N 1311, по данным измерений *in situ* в 1997 и 1998 гг.

Номер точки	Расстояние от скважины по азимуту, м	1997	1998
P1	0	3.7	0.29
P2	40 Ю	1.3	0.25
P3	60 В	1.2	0.47
P4	70 Ю	1.7	0.55
P5	100 В	1.7	2.1
P6	100 Ю	1.0	1.65
Среднее \pm СКО		1.8 ± 1.0	0.89 ± 0.79

Таблица 2. Поверхностная активность ^{137}Cs ($\text{кБк}/\text{м}^2$) в точках наблюдения вокруг скважины N 1349, по данным измерений *in situ* в 1997–1998 гг.

Номер точки	Расстояние от скважины по азимуту, м	1997	1998
P1	30 С	–	0.22
P2	30 Ю	2.2	0.08
P3	60 С	1.4	1.33
P4	60 Ю	2.2	0.33
P5	90 С	2.3	2.6
P6	90 Ю	2.2	1.1
Среднее \pm СКО		2.1 ± 0.4	0.94 ± 0.96

Таблица 3. Поверхностная активность ^{137}Cs ($\text{кБк}/\text{м}^2$) в точках наблюдения вокруг скважины N 1381, по данным измерений *in situ* в 1997–1998 гг.

Номер точки	Расстояние от скважины по азимуту, м	1997	1998
P1	15 З	–	0.27
P2	15 В	1.4	0.67
P3	60 З	1.4	0.35
P4	60 В	1.6	1.14
P5	90 З	2.4	3.4
P6	90 В	2.0	2.35
Среднее \pm СКО		1.8 ± 0.4	1.4 ± 1.3

При обследовании на площадке Балапан использовали полевые γ -спектрометры с Ge(Li)- и NaI(Tl)-детекторами, позволяющие записывать информацию о спектральном составе γ -излучателей с поверхности радиусом ~ 18 м, что само по себе позволяет получить интегральную представительную информацию. Среднее значение поверхностной активности ^{137}Cs на 12 площадках неиспользованных скважин оказалось ниже регионального уровня глобальных выпадений 2.0–2.5 $\text{кБк}/\text{м}^2$ (2.7–3.3 $\text{Бк}/\text{кг}$) на момент 1997–1999 гг. для Семипалатинского полигона в целом и для площадки Балапан в частности. Результаты обработки измерений γ -спектрометрами *in situ* на всех площадках обследованных скважин представлены в табл. 4. Значения средних значений активностей ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th в 1998 г. практически совпали с результа-

Таблица 4. Средняя поверхностная активность ^{137}Cs ($\text{kБк}/\text{м}^2$) на технологических площадках вокруг неиспользованных скважин NN 1071бис, 1074, 1327, 1330, 1343, 1383, 1386, 1389, 1409, 1419, а также скважин, в которых проводились ядерные испытания, по данным измерений *in situ*

Номер скважины	Среднее \pm СКО	Число точек снятия спектра	Интервал изменения	Годы обследования	Дата ядерного испытания [7]
1311	1.8 ± 1.0	6	1.0–3.7	1997	Не использовалась
1311	0.89 ± 0.79	6	0.25–2.1	1998	Уничтожена взрывом ВВ
1349	2.1 ± 0.4	6	1.4–2.3	1997	Не использовалась
1349	0.94 ± 0.96	6	0.08–2.6	1998	Уничтожена взрывом ВВ
1381	1.8 ± 0.4	6	1.4–2.4	1997	Не использовалась
1381	1.4 ± 1.3	6	0.3–3.4	1998	Уничтожена взрывом ВВ
1071бис	1.22 ± 0.33	8	0.7–1.1	1997	Не использовалась
1389	0.92 ± 0.4	6	0.4–2.2	1997	» »
1074	1.45 ± 0.58	6	1.0–2.5	1997	» »
1327	0.96 ± 0.66	6	0.4–2.0	1997	» »
1330	1.31 ± 0.53	6	0.5–1.8	1997	» »
1343	1.02 ± 0.31	6	0.7–1.5	1997	» »
1383	1.57 ± 0.55	6	0.7–2.0	1997	» »
1386	0.61 ± 0.22	7	0.2–0.9	1997	» »
1409	1.69 ± 0.78	6	0.8–2.6	1997	» »
Среднее для 12 скважин	1.4 ± 0.5		0.2–3.7		

Проводились ядерные испытания					
1350 (СЭК ^a)	0.83 ± 0.6 0.64 ± 0.48	17 Ge 53 NaI	0.05–1.8 0.21–2.0	1999	14.09.88, $W = 20\text{--}150 \text{ кт}^b$
1412	1.8 ± 1.3 2.1 ± 1.0	17 Ge 62 NaI	0.35–2.9 0.21–3.49	1999	12.11.88, $W = 0.001\text{--}20 \text{ кт}$
1365	1.85 ± 1.3 1.30 ± 0.77	17 Ge 69 NaI	0.35–2.7 0.21–2.83	1999	19.10.89, $W = 20\text{--}150, 0.001\text{--}20,$ $0.001\text{--}20 \text{ кт}$

^a Совместный советско-американский эксперимент.

^b W – мощность взрыва, кт ТНТ; Ge – точечная съемка с Ge(Li)-спектрометром; NaI – автомобильная сцинтилляционная съемка.

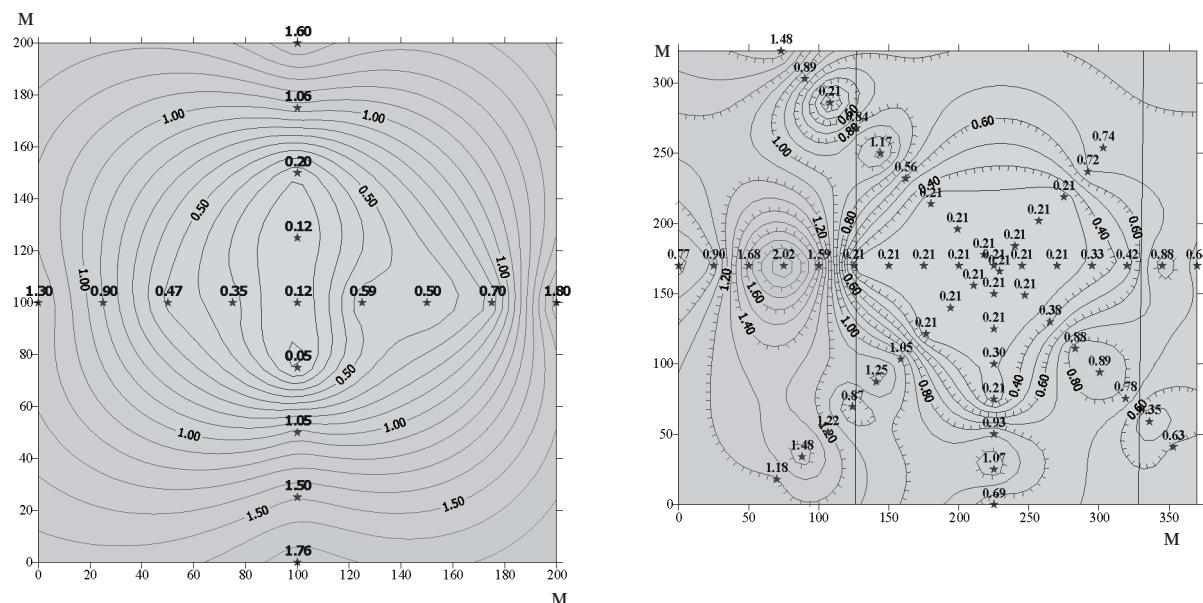


Рис. 2. Изолинии распределения ^{137}Cs на поверхности технологической площадки вокруг скважины 1350 (СЭК), $\text{kБк}/\text{м}^2$.

тами, полученными при радиационном обследовании этих же площадок в 1997 г. В то же время разброс значений активности ^{137}Cs в различных точках вокруг скважин увеличился, но при этом средняя поверхностная активность уменьшилась.

На рис. 2–4 показаны изолинии распределения ^{137}Cs в районе скважин NN 1350, 1365 и 1412, построенные по данным Ge(Li)- γ -спектрометрической съемки (a) и автомобильной сцинтилляционной NaI(Tl)- γ -спектрометрической съемки (b).

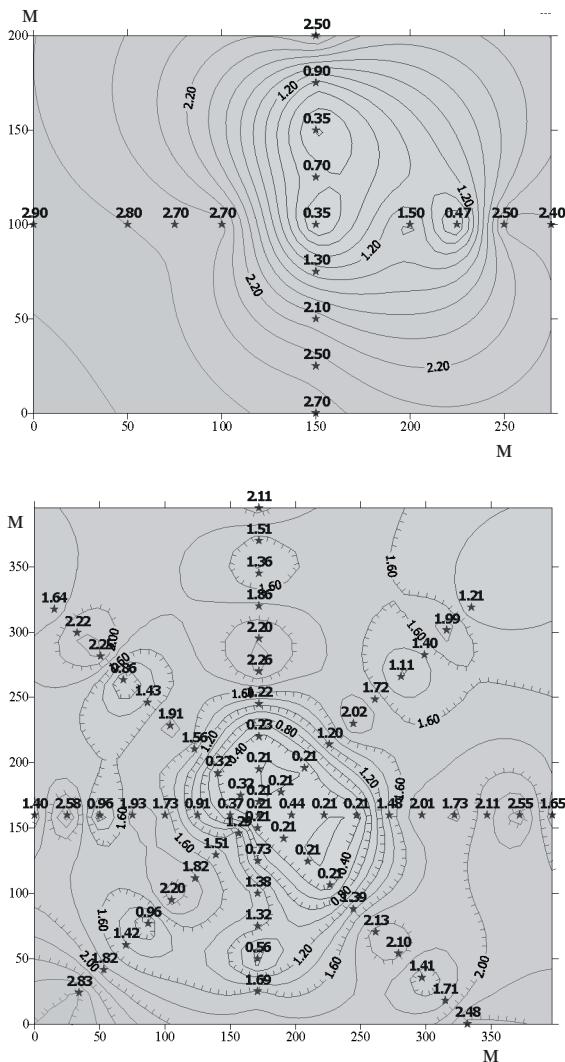


Рис. 3. Изолинии распределения ^{137}Cs на поверхности технологической площадки вокруг скважины 1365, кБк/м².

Из рис. 2 видно, что область пониженных значений поверхностной активности ^{137}Cs занимает центральную часть площадки в форме эллипса с размерами 140×130 м, на которой поверхностная активность ^{137}Cs меняется от 0.05 до 1.0 кБк/м², а среднее значение для этой площади составляет 0.51 ± 0.36 кБк/м² по данным измерений только в 12 точках.

Для площадки скважины N 1365 (рис. 3) поверхность с пониженной плотностью загрязнения ^{137}Cs от 0.35 до 1.5 кБк/м² также представлена центральным пятном размерами 115×100 м, средняя величина для этой площади составляет 0.88 ± 0.53 кБк/м² по результатам полученных спектров только в 7 точках. Такая же картина получается для площадки скважины N 1412 (рис. 4), здесь центральное пятно имеет размер 90×70 м, а средняя поверхностная активность составляет 0.92 ± 0.54 кБк/м² по данным спектров в 8 точках; интервал изменения для центрального пятна от 0.35 до 1.5 кБк/м².

Таким образом, на площадках испытанных сква-

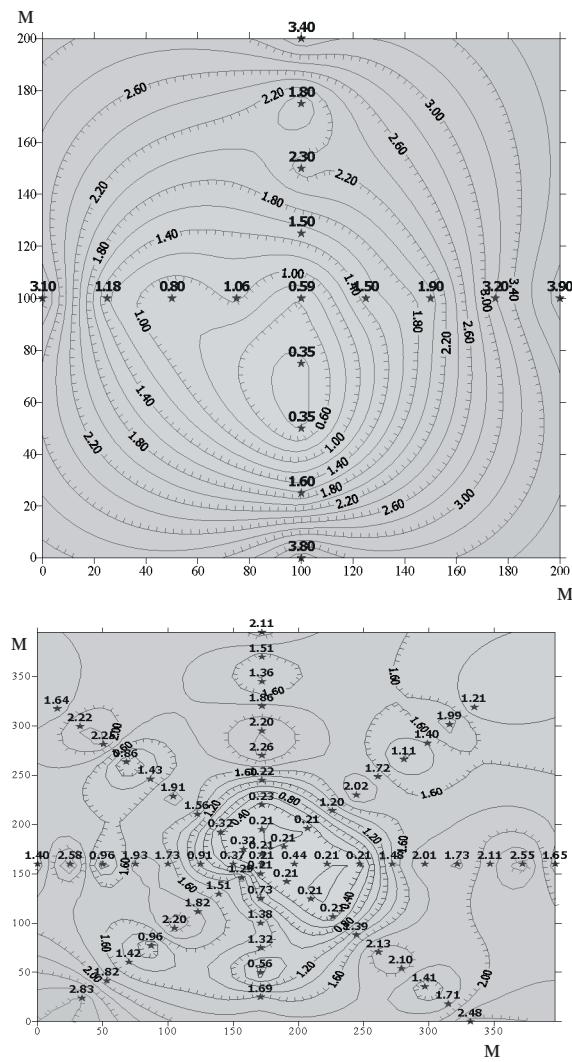


Рис. 4. Изолинии распределения ^{137}Cs на поверхности технологической площадки вокруг скважины 1412, кБк/м².

жин имеется центральное пятно площадью около 10^4 м² с пониженной плотностью загрязнения ^{137}Cs (почти в 2 раза меньше уровня регионального фона глобальных выпадений). Варьирование поверхностной активности ^{137}Cs хорошо видно из данных табл. 4.

Автомобильная γ -съемка в случае измерения поверхностного загрязнения ^{137}Cs оказалась более представительной ввиду большего количества измерений.

Как видно из данных табл. 4, для площадок скважин NN 1350, 1365 и 1412 γ -спектрометрическая съемка, проведенная двумя различными методиками, показала примерно одинаковую картину и близкие результаты, обнаружив существенное снижение регионального фона глобальных выпадений ^{137}Cs после ядерных испытаний в указанных скважинах.

Представленные на рис. 2–4 данные по поверхностной активности ^{137}Cs показывают существенный разброс (пятнистость) в различных точках вокруг скважин, в то время как разброс активности ^{40}K ,

^{238}U , ^{232}Th в разных точках вокруг скважин относительно мал, так как ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th распределены по глубине грунта практически равномерно, а ^{137}Cs со средоточен в верхнем 5–10-сантиметровом слое грунта. Анализ показал, что в радиусе 50–100 м вокруг испытанных скважин радиационное поле ^{137}Cs становится ниже регионального уровня глобальных выпадений. Глобальный уровень выпадений ^{137}Cs иногда появляется в крайних точках обследования, т.е. за пределами технологической площадки. Видимые следы проведения этих работ обнаруживаются во многих местах обследованных площадок, и, по нашему мнению, понижение содержания ^{137}Cs в слое грунта, безусловно, является результатом инженерно-технической деятельности при работах по бурению и созданию испытательной скважины.

Заключение

Таким образом, проведенные в 1997–1999 гг. исследования на площадке Балапан бывшего Семипалатинского полигона показали, что в результате взрыва полного камуфлажа (без истечения и просачивания радиоактивных благородных газов) может происходить искажение радиационного поля в сторону снижения регионального уровня глобальных выпадений ^{137}Cs , обусловленное в основном подготовительными строительно-монтажными работами. Поэтому, с нашей точки зрения, этот эффект является в основном результатом инженерно-технической деятельности в период подготовки скважины и технологической площадки к ядерному испытанию, и обнаруживаемая пятнистость (неравномерность) плотности загрязнения грунта ^{137}Cs является дополнительным подтверждением обнаруженного остаточного явления.

На площадках созданных скважин, в которых взрыв не проводился, также происходит снижение регионального фона глобальных выпадений вследствие работ по созданию скважин. Это может послужить дополнительным признаком, указывающим на проведение скрытого (необъявленного) ядерного взрыва. Такой же эффект можно ожидать и на приусадебной площадке в случае проведения скрытого ядерного взрыва в горизонтальной выработке (штолне). Выявленный эффект может быть исполь-

зован при проведении инспекции на месте в рамках ДВЗЯИ.

Разработанная нами методика с применением автомобильного высокочувствительного сцинтилляционного спектрометра и Ge-спектрометров позволяет осуществлять высококачественный радиологический контроль: выявлять те объекты на местности, где проводились работы, приводящие к значительному перемещению грунта, нарушающего естественное для данного района распределение искусственных радионуклидов, а именно ^{137}Cs от глобальных выпадений в поверхностном (5–10 см) слое земли.

По нашему мнению, обнаруженный эффект можно использовать в качестве поискового признака в методике проведения инспекции на месте.

Авторы признательны сотрудникам лаборатории к.ф.-м.н. Е. И. Бирюкову, В. К. Ермилову, М. Н. Москалеву, П. Б. Малахову и Б. О. Шагину за активное участие в полевых исследованиях и обработке полученной информации.

Список литературы

- [1] Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), принят Генеральной Ассамблеей ООН 10 сентября 1996 г. Вена, 2013.
- [2] Dubasov Yu. V. // Pure Appl. Geophys. 2010. Vol. 167. P. 455–461.
- [3] Дубасов Ю. В., Баранов Ю. И., Бирюков Е. И. и др. Радиологическое обследование двенадцати испытанных ракетных шахт и десяти порталов штолен в массиве Дегелен в Республике Казахстан: Заключительный отчет о полевых исследованиях. СПб.: Радиевый ин-т им. В. Г. Хлопина, 1997.
- [4] Дубасов Ю. В., Бирюков Е. И., Гаврилин С. С. и др. Радиологическое исследование испытательной площадки Балапан и горного массива Дегелен: Заключительный отчет. СПб.: Радиевый ин-т им. В. Г. Хлопина, 1998.
- [5] Дубасов Ю. В., Бирюков Е. И., Гаврилин С. С. и др. Радиологические исследования испытательной площадки Балапан и горного массива Дегелен в Республике Казахстан после уничтожения объектов: Заключительный отчет. СПб.: Радиевый ин-т им. В. Г. Хлопина, 1999 г.
- [6] Дубасов Ю. В., Бирюков Е. И., Гаврилин С. С. и др. Радиоэкологические обследования, связанные с выполнением работ на объектах D, D2 и D4 бывшего Семипалатинского полигона: Отчет о выполнении работ по этапу 0037, январь–март 2010 г. СПб.: Радиевый ин-т им. В. Г. Хлопина, 2010.
- [7] Ядерные испытания СССР / Под ред. В. Н. Михайлова. М.: ИздАТ, 1997.