

УДК 504.054:539.122.164:539.16

ПЕШЕХОДНАЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ

Бакланова Ю.В., Кривицкий П.Е., Умаров М.А., Мустафина Е.В., Божко В.В., Монаенко В.Н.

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе представлен метод пешеходной гамма-спектрометрической съемки, позволяющий оперативно определять концентрацию радионуклидов в поверхностном слое почвы посредством получения массива спектров. Приведена сравнительная оценка данных о содержании ^{241}Am и ^{137}Cs в почве, полученных сопряженно в натуральных условиях Семипалатинского испытательного полигона (скорость счета гамма-импульсов (*in situ*)), и в результате лабораторного гамма-спектрометрического анализа. Получены коэффициенты перехода, по которым произведено построения карт площадного распределения радионуклидов путем пересчета скоростей счета в площадную активность с учетом плотности почвы.

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон (СИП), площадка «Опытное поле», пешеходная гамма-спектрометрическая съемка (ПГСС), гамма-спектр, площадное распределение радионуклидов.

ВВЕДЕНИЕ

Знание радиэкологической обстановки территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате радиационных аварий, инцидентов на предприятиях ядерно-топливного цикла и испытаний ядерного оружия является важным с точки зрения радиационной безопасности. В большинстве случаев радиационный контроль осуществляется посредством лабораторного анализа проб окружающей среды, отобранных на обследуемой территории. Данный подход, как правило, требует длительного времени на проведение всех необходимых анализов и, как следствие, теряется оперативность радиационного контроля, а значит и своевременное реагирование на возможный инцидент. В связи с этим, необходимы методы быстрой оценки радиоактивного загрязнения местности, позволяющие в течение достаточно короткого времени получить достоверную информацию о существовании радиоактивного загрязнения, определить его масштаб, характер и уровни.

Также, при радиэкологическом обследовании обширных территорий или крупных объектов, где площадь объекта обследования может составлять десятки квадратных километров, а участки радиоактивного загрязнения иметь узлокальный характер всего в несколько квадратных метров, необходимо определить точное позиционирование в пространстве и последующее построение детальных карт радиоактивного загрязнения для правильного понимания сложившейся ситуации. В соответствии с чем метод должен иметь возможность координатной привязки с небольшой погрешностью в пространстве.

И последним, но наиболее важным фактором, является возможность достоверной регистрации даже относительно небольшого количества радиоактивного излучения. Из всех видов радиоактивных излучений наибольшей проникающей способностью, а соответственно и опасностью обладает гамма-излучение (гамма-кванты). В настоящее время гамма-спектрометрическое обследование территории проводит-

ся двумя путями: отбор проб почвы с последующим лабораторным анализом и гамма-спектрометрическая съемка *in situ*. В первом случае производят отбор проб по сети обследования, после чего проводят последовательный лабораторный гамма-спектрометрический анализ проб с предварительной пробоподготовкой. Существенным недостатком данного метода в случае проведения масштабного обследования территорий, как обговаривалось ранее, является длительность выполнения лабораторного гамма-спектрометрического анализа (чем больше территория, тем больше количество проб и времени, затрачиваемого на их измерение). При этом, построение карт радиационной обстановки выполняется после гамма-спектрометрических измерений всех проб. Все это сказывается на своевременности действий и принятия мер реагирования на возможный инцидент.

В случае полевой (*in situ*) гамма-спектрометрии, оценка загрязнения гамма-излучающими радионуклидами проводится быстрее, а соответственно более подходит для оперативного контроля. Гамма-съемку можно подразделить на съемку в фиксированных позициях и съемку в движении. С точки зрения обследования территорий, а не конкретного объекта, проведение измерения в движении более целесообразно. По условиям проведения съемку в движение подразделяют на пешеходную, авто- и аэрогаммасъемку, из них наиболее распространенной является последняя. Однако ее использование довольно дорогостояще, а также не имеет возможности регистрации гамма-излучающих радионуклидов с небольшой энергией выхода гамма-кванта (^{241}Am) [1–5]. В этом случае использование пешехода способно повысить чувствительность измерения, хоть и применение подобной методики возможно не везде, так как измерение будет проводиться непосредственно человеком.

В данной работе рассматривается пешеходная гамма-спектрометрическая съемка (ПГСС), объединяющая достоинства перечисленных ранее методов радиэкологического обследования территорий –

простоту и доступность радиометрической съёмки, точность полевой гамма-спектрометрии и возможность обследования больших территорий (аэрогам-масьемка). Целью настоящего исследования являлась оценка эффективности применения пешеходной гамма-спектрометрической съёмки на площадке «Опытное поле» Семипалатинского испытательного полигона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реализация ПГСС стала возможной благодаря развитию современных технологий. В нашем случае для ПГСС используются гамма-спектрометры со сцинтилляционными детекторами на основе кристалла бромида лантана ($\text{LaBr}_3(\text{Ce})$) на базе многоканальных анализаторов импульсов *DigiBase (ORTEC, США)* и портативные компьютеры.

ПГСС основан на непрерывном наборе гамма-спектров во время движения пешехода-спектрометриста по заданному профилю с любой заданной плотностью сети обследования на обследуемой территории. Координатная привязка и запись спектрометрических данных осуществляется автоматически с помощью систем GPS-навигации, с сохранением на портативный компьютер. Измерение гамма-излучающих радионуклидов проводилось на высоте 0,5 м от поверхности почвы. Гамма-детекторы были направлены вниз, перпендикулярно поверхности почвы. Координатная привязка и результаты измерений осуществлялась автоматически с помощью систем GPS-навигации с сохранением на ноутбук через каждые 10 с. Затем проводится обработка полученных гамма-спектров, по результатам которой строятся карты радиоактивного загрязнения обследуемой территории (участка). При необходимости, возможно построение карт по каждому интересующему радионуклиду в отдельности.

Для калибровки ПГСС проведен анализ корреляционной зависимости между результатами ПГСС и результатами лабораторного гамма-спектрометрического анализа проб почвы. Анализ проводился по двум гамма-излучающим радионуклидам: ^{241}Am и ^{137}Cs . Для определения содержания данных радионуклидов в лабораторных условиях использовались гамма-спектрометры с полупроводниковым детектором на основе чистого германия с высоким энергетическим разрешением (*ORTEC, США*) на базе многоканальных анализаторов импульсов *digiDART*. Измерения проводились в соответствии с методикой выполнения измерений на гамма-спектрометре №5.06.001.98 РК [6].

В качестве критерия оценки чувствительности спектрометров (пределов обнаружения и измерения малых активностей) используют такое понятие, как минимально детектируемая активность (МДА). Поскольку в ходе проведения ПГСС определяется не активность интересующего радионуклида, а его скорость счета в окне регистрации, то вместо значения МДА применялось значение нижнего предела изме-

рений (НПИ). Для этого, перед началом проведения исследования, на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) была выбрана площадка с низким содержанием радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs где проводились гамма-спектрометрические измерения фоновых спектров. Время набора каждого спектра, для увеличения статистики, составляло 1800 с. Значение НПИ, с учетом фоновых характеристик гамма-детекторов, определялось по формуле:

$$\text{НПИ}_{t_f,i} = \frac{3\sqrt{N_{f,i}}}{t_f}, \quad (1)$$

где: $\text{НПИ}_{t_f,i}$ – фоновое значение i -го радионуклида нижнего предела измерений, импульс/с; $N_{f,i}$ – сумма импульсов в окне регистрации i -го радионуклида, в фоновом спектре, импульс/с; t_f – время измерения фонового спектра, с.

Из анализа гамма-спектров установлены фоновые значения нижнего предела измерений $\text{НПИ}_{t_f,i}$ для ^{241}Am и ^{137}Cs , равные 0,7 импульс/с и 0,15 импульс/с соответственно.

Так как время измерения при проведении ПГСС составляет 10 с, а не 1800 с, необходимо произвести пересчет НПИ_i для действительного времени измерения:

$$\text{НПИ}_i = \text{НПИ}_{t_f,i} \cdot \sqrt{1 + \frac{t_f}{t_i}}, \quad (2)$$

где: $\text{НПИ}_{t_f,i}$ – значение нижнего предела измерений i -го радионуклида при проведении ПГСС, импульс/с; t_f – время измерения фонового спектра; t_i – время измерения спектра при проведении гамма-спектрометрической съёмки для i -го радионуклида.

Согласно анализу гамма-спектров, значения НПИ за время измерения, равное 10 с, составляют 5 и 3 импульс/с для ^{241}Am и ^{137}Cs соответственно.

С целью калибровки детекторов выбран участок площадки «Опытное поле», где в 50 точках проведены измерения полевыми детекторами. Время набора каждого спектра составило не менее 60 с.

В результате ПГСС получен набор гамма-спектров, характеризующих площадное распределение гамма-излучающих радионуклидов на выбранном участке площадки «Опытное поле». После обработки гамма-спектров получен массив количественных данных (скоростей счета, импульс/с) по основным интересующим линиям – 59,5 кэВ (^{241}Am) и 662 кэВ (^{137}Cs).

Далее в точках, выбранных для проведения измерений полевыми детекторами, отбирались пробы почвы на глубину 5 см с площадью 200 см² в каждой точке отбора для последующего определения удельной активности ^{241}Am , ^{137}Cs в лабораторных условиях гамма-спектрометрическим методом.

При обработке экспериментальных данных приняты коэффициенты перехода от скорости счета полевого детектора к удельной активности для анализируемых радионуклидов, которые составили: для ^{241}Am – 86, ^{137}Cs – 71 (рисунки 1 и 2).

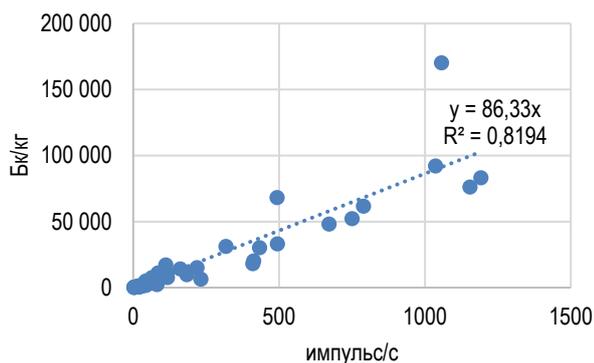


Рисунок 1. Отношение скорости счета (импульс/с) к удельной активности (Бк/кг) для ^{241}Am

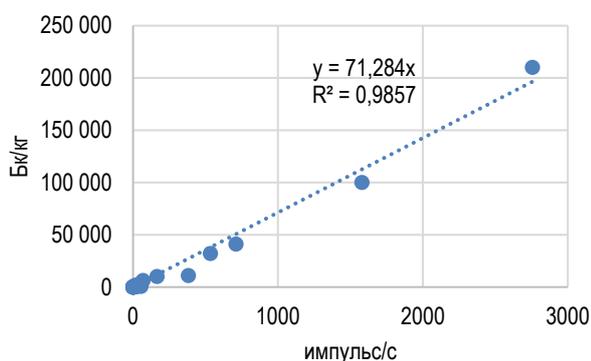


Рисунок 2. Отношение скорости счета (импульс/с) к удельной активности (Бк/кг) для ^{137}Cs

Сопоставление результатов радиоактивного загрязнения почвенного покрова по данным полевых и лабораторных гамма-спектрометрических измерений показало хорошую корреляцию.

Полученные коэффициенты применялись для расчета площадной активности радионуклидов путем пересчета скоростей счета. Плотность почвы принималась равной 1600 кг/м^3 .

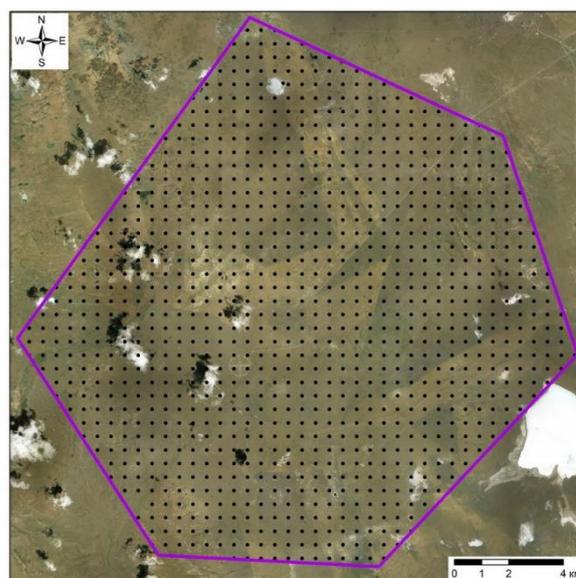
Площадная активность интересующих радионуклидов в верхнем слое почвы определялась по формуле:

$$A_{s,i} = \frac{A_{i,0-5} \cdot \rho \cdot V}{s}, \quad (3)$$

где: $A_{s,i}$ – площадная активность i -го радионуклида, Бк/м^2 ; $A_{i,0-5}$ – удельная активность i -го радионуклида в верхнем слое почвенного покрова, Бк/кг ; ρ – плотность почвы, кг/м^3 ; V – объем пробы почвы, м^3 ; s – площадь отбора проб верхнего слоя почвенного покрова, м^2 .

Для апробации ПГСС на территории площадки «Опытное поле» были проведены совместные работы по отбору проб почвы и ПГСС. На обследуемую территорию накладывалась сеть обследования (рисунок 3).

Для отбора проб почвы была принята сеть обследования $0,5 \times 0,5 \text{ км}$ (рисунок 3, а). Для ПГСС 10 м между профилями (рисунок 3, б).



Условные обозначения

— граница площадки «Опытное поле» • точки отбора проб почвы

а)



Условные обозначения

— граница площадки «Опытное поле» • точки пешеходной гамма-съемки

б)

Рисунок 3. Сеть обследования выбранной территории СИП: для проб почвы (а), для ПГСС (б) (представлен только верхний участок)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенной пешеходной гамма-спектрометрической съемки получен массив гамма-спектров, характеризующих площадное распределение гамма-излучающих радионуклидов на обследуемой территории. Диапазон скоростей счета составил от 5 до 1192,6 импульс/с для ^{241}Am и от 3 до 2757 импульс/с – для ^{137}Cs . Согласно выполненным лабораторным анализам, максимальные значения удельной

**ПЕШЕХОДНАЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ
РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ**

активности ^{241}Am и ^{137}Cs составили 170000 Бк/кг и 210000 Бк/кг, минимальные значения – 52 Бк/кг и 22 Бк/кг соответственно.

Характер радиоактивного загрязнения почвенного покрова обследуемой территории представлен в виде карт распределения техногенных радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs на рисунках 4 и 5.

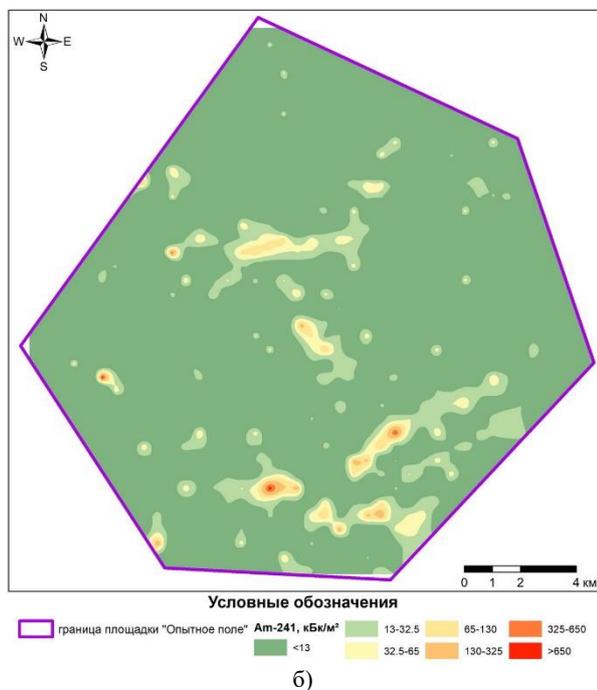
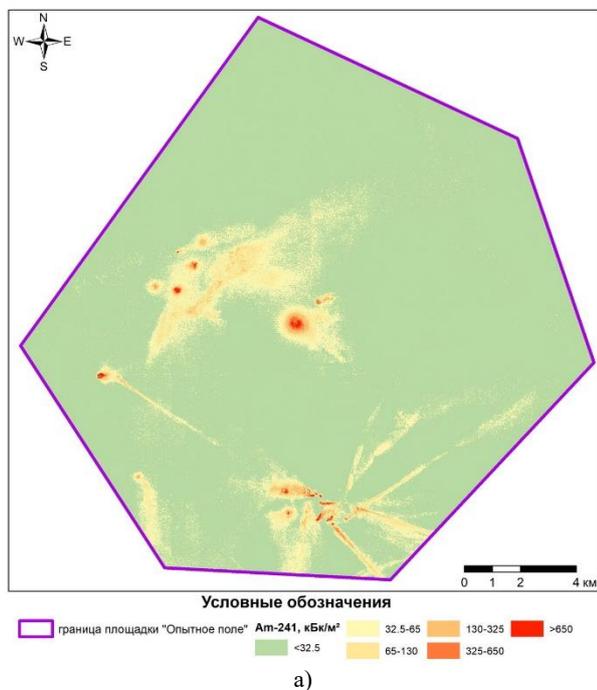


Рисунок 4. Поверхностное распределение ^{241}Am : ПГСС (а); отбор проб почвы (б)

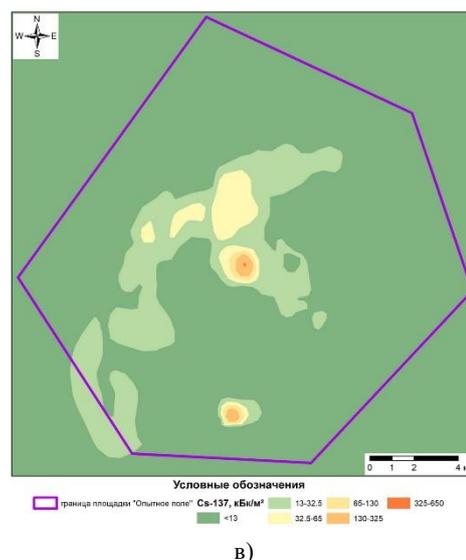
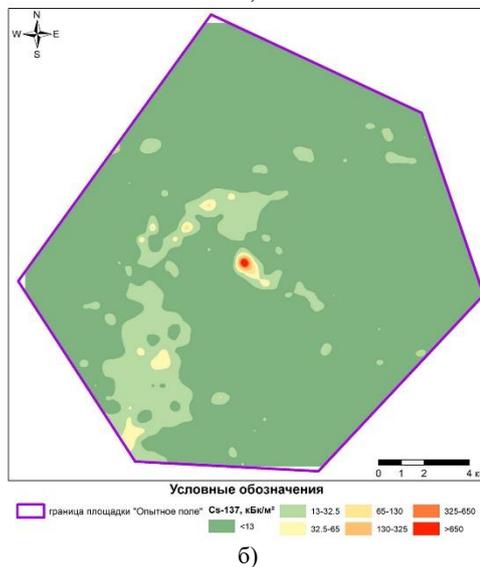
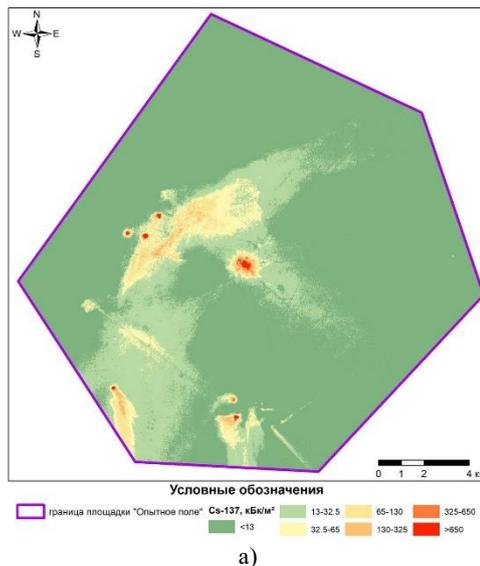


Рисунок 5. Поверхностное распределение ^{137}Cs : ПГСС (а); отбор проб почвы (б); аэрогаммасъемка (в)

На картах распределения ^{241}Am четко прослеживается разница в результатах обследования, уровень детализации радиоактивного загрязнения при ПГСС значительно информативней. Единственным минусом ПГСС перед отбором проб является более низкая чувствительность, что как раз прослеживается при регистрации радионуклидов с относительно небольшой энергией испускания гамма-квантов, таких как ^{241}Am у которого данная энергия составляет 59,5 кэВ. Это напрямую влияет на предел обнаружения и вследствие этого не подходит для обследования «фоновых» территорий, но этот факт никак не противоречит целям данной съемки, так как основной ее целью является как раз выявление аномалий, а в этом случае ПГСС выходит гораздо продуктивней и соответственно предпочтительней по итогу.

Схожая ситуация обстоит и с ^{137}Cs , с одним лишь отличием, что в данном случае чувствительность ПГСС будет выше, вследствие большей энергии испускания гамма-квантов, которая составляет 662 кэВ. Также для примера представлена карта распределения ^{137}Cs , полученная по результатам аэрогаммасъемки (рисунок 5, в). Как можно наблюдать, детализация в данном случае еще ниже, чем при отборе проб, но в отличии от него отсутствует вероятность пропуска участка радиоактивного загрязнения. Из всего вышеизложенного наглядно видно, что ПГСС значительно превосходит своих оппонентов по возможности радиационного обследования, при том, что данная съемка требует гораздо меньше трудозатрат и времени.

Резюмируя вышеизложенное можно сказать, что ПГСС позволяет определить контур и уровни площадного распределения гамма-излучающих радионуклидов с высокой степенью детализации и точности. А используя полученные коэффициенты перехода можно провести расчёт площадной активности и построить карты площадного распределения ^{241}Am и ^{137}Cs .

ЛИТЕРАТУРА

1. Аэрогамма-спектрометрический метод поисков рудных месторождений: Метод. руководство / [В.П. Воробьев, А.В. Ефимов, М.И. Альтшулер и др.]. – Л.: «Недра». Ленингр. отделение, 1977. – 216 с.
2. Дровников В.В., Егоров М.В., Егоров Н.Ю., Живун В.М., Кадушкин А.В., Коваленко В.В. Разработка аэрогамма-спектрометрических технологий поиска и идентификации техногенных радиоактивных источников // «АНРИ». – 2005. – №3 (42). – с. 10–14.
3. Израэль Ю.А., Вакуловский С.М., Ветров В.А. и др. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. М.: Гидрометеониздат, 1990. – 296 с.
4. Потапов В.Н. Разработка радиометрических систем и методов полевых и дистанционных измерений радиоактивного загрязнения: автореф. дис. ... д-р. физ.-мат. наук: 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики. – Москва, 2010. – 48 с.
5. Пруткин М.И., Шашкин В.Л. Справочник по радиометрической разведке и радиометрическому анализу. -2-е изд., перераб. и доп.: М.: Энергоатомиздат, 1984, с.57–61.
6. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика измерений на гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения «SpectraLine» – Введ. 2004-08-26. – Рег. № KZ.07.00.00303-2004 – М.: РГПИ «Казахский институт метрологии».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При рассмотрении пешеходной гамма-спектрометрической съемки в качестве инструмента оценки радиоактивного загрязнения территорий приняты коэффициенты перехода от скорости счета полевого детектора к удельной активности для анализируемых радионуклидов, которые составили: для ^{241}Am – 86, ^{137}Cs – 71. Применяя полученные коэффициенты перехода от скорости счета полевого детектора к удельной активности и, далее, к площадной активности, были рассчитаны площадные активности и построены карты распределения ^{241}Am и ^{137}Cs территории испытательной площадки СИП.

Проведена сравнительная оценка различных методов оценки радиоактивного загрязнения территорий, установлено, что уровень детализации радиоактивного загрязнения при ПГСС значительно информативней, чем при отборе проб и аэрогаммасъемке.

Метод ПГСС позволяет оперативно определять концентрацию гамма-излучающих радионуклидов природного и техногенного происхождения в почвенном покрове, определить контур и уровни площадного распределения гамма-излучающих радионуклидов с высокой степенью детализации и точности.

Работа выполнена в рамках темы «Разработка новых методов оценки радиационного состояния объектов ЯТЦ» РБП 036 «Развитие атомных и энергетических проектов», подпрограммы 105 «Прикладные научные исследования технологического характера в сфере атомной энергетики», мероприятие «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» на 2018–2020 гг.

АУМАҚТЫҢ РАДИОАКТИВТІ ЛАСТАНУЫН БАҒАЛАУ ҚҰРАЛЫ
РЕТІНДЕ ЖАЯУ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЯЛЫҚ ТҮСІРУ

Ю.В. Бакланова, П.Е. Кривицкий, М.А. Умаров, Е.В. Мустафина, В.В. Божко, В.Н. Монаенко

ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

Мақалада жаяу гамма-спектрометриялық түсіру әдісі берілген, ол спектрлер массивін алу арқылы топырақтың беткі қабатындағы радионуклидтердің шоғырлануын жедел анықтауға мүмкіндік береді. Семей сынақ полигонының табиғи жағдайымен бірге алынған (гамма-импульсті есептеу жылдамдығы (*in situ*)) және зертханалық гамма-спектрометриялық талдау нәтижесіндегі топырақтағы ^{241}Am және ^{137}Cs құрамы туралы мәліметтерге салыстырмалы бағалау келтірілген. Радионуклидтердің алаңдық таралу карталары топырақтың тығыздығын есепке отырып алаңдық белсенділігінің жылдамдығын есептеу арқылы құрылды соған сәйкес өту коэффициенттері алынды.

Кілт сөздер: Семей сынақ полигоны (ССП), «Тәжірибе даласы» алаңы, жаяу гамма-спектрометриялық түсіру (ЖГСТ), гамма-спектр, радионуклидтердің алаңдық таралуы.

PEDESTRIAN GAMMA-SPECTROMETRIC SURVEY AS A TOOL FOR
ASSESSING RADIOACTIVE CONTAMINATION OF TERRITORIES

Yu.V. Baklanova, P.Ye. Krivitsky, M.A. Umarov, Ye.V. Mustafina, V.V. Bozhko, V.N. Monayenko

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper provides a pedestrian gamma-spectrometric survey technique that allows prompt determination of the concentration of radionuclides in topsoil by accumulating an array of spectra. A comparative assessment of data on the content of ^{241}Am and ^{137}Cs in soil is given, simultaneously obtained in full-scale conditions of Semipalatinsk Test Site (gamma-count rate (*in situ*)), and as a result of the *in vitro* gamma-spectrometric analysis. Transfer factors were derived based on which maps of the areal distribution of radionuclides were plotted by converting count rates to the areal activity given soil density.

Keywords: Semipalatinsk Test Site (STS), "Experimental Field" site, pedestrian gamma-spectrometric survey (PGSS), gamma-spectrum, areal distribution of radionuclides.