

Применение гамма-спектрометрических технологий в автомобильной гамма-съемке местности в окрестностях АЭС РФ

Приводятся результаты применения разработанных в НИЛ ЯФТРК гамма-спектрометрических технологий автомобильной гамма-съемки местности в окрестностях действующей АЭС [1-7]. Принципиальной особенностью разработанных методов является возможность эффективного обнаружения техногенных источников гамма-излучения и определение их характеристик без использования какой-либо априорной информации о параметрах источника и фоновых характеристиках местности, в том числе в реальном времени при движении автомобиля и в условиях сильных пространственных вариаций радиационного фона. Описываемые гамма-спектрометрические методы принципиально выигрывают по чувствительности и информативности у дозиметрических. Ключевым элементом гамма-спектрометрических технологий НИЛ ЯФТРК являются специализированные методы обработки и анализа гамма-спектрометрических данных, реализованные в программе «Na Avto Spectra Analysis System» – SAS Na Avto.

**В.В.Дровников, Н.Ю.Егоров,
В.М.Живун, А.В.Кадушкин,
В.В.Коваленко**

(Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» – НИЯУ МИФИ
Лаборатория «Ядерно-физические технологии радиационного контроля» – НИЛ ЯФТРК)

Ключевые слова:

АСКРО АЭС, гамма-съемка местности, поиск техногенных источников гамма-излучения, мощность дозы, автомобильный гамма-спектрометр, In-Situ гамма-спектрометр, критерий обнаружения техногенного источника гамма-излучения, нормализованный спектральный индекс NSI, программы SMS Na Avto и SAS Na Avto.

Постановка задачи гамма-съемки местности в документах Концерна «Росэнергоатом»

Различными нормативными документами Концерна «Росэнергоатом» предусматривается выполнение автомобильной гамма-съемки местности в окрестностях АЭС, в том числе при ее функционировании в штатном режиме.

Рассмотрим требования к проведению автомобильной гамма-съемки местности в окрестностях АЭС на примере документа «СТО 1.1.1.01.001.0875-2017. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки атомной электростанции. Технические требования».

В обязательном Приложении Г «Технические требования к передвижной радиометрической лаборатории» в разделе «Г.1. Задачи, возлагаемые на ПРЛ» говорится:

«...Автомобильные лаборатории радиационной разведки... предназначены для выполнения оперативных измерений параметров радиационной обстановки на местности и в населенных пунктах при нормальной эксплуатации АС и в условиях радиационных аварий...

Г.1.1 Передвижные радиометрические лаборатории должны позволять:

- проводить гамма-съемку местности; ...».

Далее в Таблице Г.1. «Состав и назначение основных измерительных приборов и вспомогательного оборудования ПРЛ» указано, что «...Дозиметр ДМГ-01, БДКГ-24, или аналог... предназначен для измерения мощности амбиентной дозы гамма-излучения с целью оперативного получения данных о радиационной обстановке на местности, поиска локальных зон радиоактивного загрязнения и источников ионизирующего излучения методом наземной гамма-съемки местности».

Таким образом, документом «СТО 1.1.1.01.001.0875-2017. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки атомной электростанции. Технические требования»

предписывается выполнение гамма-съемки местности в дозиметрическом режиме.

Покажем, что дозиметрический подход крайне неэффективен для «поиска локальных зон радиоактивного загрязнения и источников ионизирующего излучения» в окрестностях АЭС при ее нормальной эксплуатации.

Для этого рассмотрим результаты эксперимента, проведенного специалистами НИЛ ЯФТРК в июне 2019 г. в окрестностях г. Киреевск Тульской области. Основной задачей эксперимента являлась демонстрация того, что в условиях, максимально приближенных к описанным в нормативных документах Концерна «Росэнергоатом», гамма-спектрометрический подход к проведению автомобильной гамма-съемки местности на предмет обнаружения участков с повышенным содержанием техногенных гамма-излучающих радионуклидов безусловно выигрывает у дозиметрического. Умеренно загрязненные вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. территории вокруг г. Киреевск имитировали техногенное загрязнение местности в окрестностях нормально функционирующей АЭС.

Подчеркнем, что речь шла именно о демонстрации, т. к. научно-методическая сторона вопроса еще в 1995–2006 гг. была детально исследована специалистами НИЛ ЯФТРК в различных экспериментах [1-5]. Было однозначно и многократно показано [1-5], что гамма-спектрометрические технологии поиска ТИ принципиально превосходят дозиметрический подход в части обнаружения ТИ, другими словами, дозиметрические методы поиска ТИ принципиально не позволяют достигнуть чувствительности и эффективности гамма-спектрометрических методов поиска ТИ.

Попутно заметим, что согласно документу «СТО 1.1.1.01.001.0875-2017. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки атомной электростанции. Технические требования» автомобильная



Рис.1.
Дозиметр-радиометр СРП-68 с детектором NaI(Tl) Ø20×20 мм, подключенный к персональному компьютеру.

лаборатория радиационной разведки формально является составной частью АСКРО АЭС. Соответственно, все сказанное ниже можно рассматривать и как исследования возможности улучшения характеристик АСКРО АЭС за счет применения гамма-спектрометрических технологий.

2. Аппаратурное и методическое обеспечение эксперимента

Гамма-съемка местности была выполнена при помощи установленного на автомобиле *Mitsubishi Outlander XL* аппаратного комплекса, включавшего в себя:

- дозиметр-радиометр СРП-68 с детектором NaI Ø20×20 мм (рис.1);
- автомобильный гамма-спектрометр с детектором NaI большого объема (рис.2);
- *In-Situ* гамма-спектрометр ВВК-1 с детектором NaI Ø76×76 мм (рис.3);
- персональный компьютер (далее – ПК) в защищенном промышленном исполнении;
- дополнительный GPS-приемник.

2.1. Доработка дозиметра-радиометра СРП-68.

В обсуждаемых измерениях дозиметр-радиометр СРП-68 с детектором NaI (рис.1) применялся как аналог дозиметров ДМГ-01, БДКГ-24 (см. Таблицу Г.1 документа

СТО 1.1.1.01.001.0875-2017). Прибор был откалиброван и отградуирован для измерения мощности дозы в полях гамма-излучения радионуклида ¹³⁷Cs. Хотя СРП-68 и не находится в настоящее время в Государственном реестре средств измерений, для решения исследовательских задач он оказался вполне подходящим.

Для работы в составе аппаратного комплекса прибор СРП-68 был соответствующим образом доработан, что обеспечило следующие возможности:

- функционирование под управлением ПК;
- организация циклических измерений значений мощности дозы с требуемыми значениями длительности и периодичности;
- пристыковка к каждому измеренному значению мощности дозы соответствующих ей значений координат и момента времени;
- отображение на экране ПК непосредственно в процессе измерений значений мощности дозы в виде профиля мощности дозы вдоль траектории движения автомобиля или карты;
- возможность экспорта получаемых данных (значения мощность дозы, координат и времени) в другие программы для совместной обработки с данными от автомобильного гамма-спектрометра.

В обсуждаемом эксперименте значение мощности дозы измерялось в циклическом режиме

с длительностью и периодичностью 1 секунда, т. е. временной зазор между двумя последовательными измерениями мощности дозы был пренебрежимо мал по сравнению с длительностью измерения. К полученному при каждом измерении значению мощности дозы пристыковывались соответствующие значения координат и времени, и этот набор данных сразу же передавался в ПК для обработки. Таким образом, при скорости движения автомобиля 36 км/час каждое значение мощности дозы оказывалось «привязанным» к участку маршрута длиной ≈ 10 метров.

2.2. Автомобильный гамма-спектрометр

Автомобильный гамма-спектрометр (рис.2) предназначен для обнаружения, идентификации и оценки характеристик загрязнений местности техногенными гамма-излучающими радионуклидами (далее – техногенный источник – ТИ). Указанные функции реализуются в автоматическом режиме непосредственно при движении автомобиля по обследуемой территории.

В состав гамма-спектрометра входят следующие основные элементы:

- спектрометрический модуль (далее – СМ), включающий:
 - от 1 до 4 независимых гамма-спектрометров, каждый на основе детектора NaI объемом 2÷4 литра и цифровой спектрометрический процессор, совмещенный с источником высоковольтного питания ФЭУ;
 - одноплатный компьютер PCI-104;
 - аккумуляторное питание;
 - GPS-приемник;
 - беспроводной интерфейс *Wi-Fi*;
 - система температурного демпфирования/обогрева детекторов NaI;
 - виброразвязывающая платформа;
 - средства дистанционного управления СМ;
 - корпус СМ;



Рис.2. Размещение автомобильного гамма-спектрометра в задней части автомобиля Mitsubishi Outlander XL для проведения гамма-съемки местности. На крышке контейнера лежит дополнительный датчик навигации Garmin GPS 18x5 Hz.

- ПК в защищенном промышленном исполнении с собственным монитором и встроенным беспроводным интерфейсом *Wi-Fi* для связи с СМ;
- вспомогательное оборудование:
 - дополнительный GPS-приемник;
 - портативный маршрутизатор *Wi-Fi*;
 - резервные аккумуляторы;
 - зарядное устройство для СМ;
 - видеорегистраторы;
- программно-методическое обеспечение функционирования гамма-спектрометра «*Na Avto Spectra Measuring System*» – *SMS Na Avto*;
- программно-методическое обеспечение обработки и представления результатов измерений «*Na Avto Spectra Measuring System*» – *SMS Na Avto*.

2.3. Основные моменты функционирования автомобильного гамма-спектрометра в части обнаружения ТИ и оценки его характеристик

В обсуждаемом эксперименте гамма-спектрометрические измерения проводились аналогично описанному выше измерению мощности дозы, т. е. в циклическом режиме с длитель-

ностью и периодичностью 1 секунда и соответствующей координатной привязкой (п. 2.1).

Исходными данными для применявшихся методов обнаружения ТИ и оценки его характеристик является следующий набор результатов измерений: накопленный спектр, живое время его измерения, время и географические координаты начала и конца набора каждого спектра.

На основе этих данных методы позволяют определить:

- величину критерия обнаружения (присутствия) ТИ для каждого измерения «нормализованный спектральный индекс *NSI*» и пространственное распределение этого критерия по обследованной территории;
- спектр гамма-излучения ТИ и его радионуклидный состав, т. е. проводить однозначную идентификацию ТИ;
- величину скорости счета от ТИ в каждом измерении и распределение скорости счета по обследованной территории;
- координаты обнаруженного локального ТИ (или источников);
- погрешности выше перечисленных величин.

Обсуждаемые методы характеризуются следующими основными моментами:

- обнаружение ТИ и оценка его характеристик проводится без использования какой-либо априорной информации о характеристиках ТИ;
- обнаружение ТИ и оценка его характеристик проводится без использования априорной информации о фоновых характеристиках местности, на которой проводятся измерения;
- обнаружение ТИ и оценка его характеристик обеспечивается в реальном времени, т. е. непосредственно в процессе измерений;



Рис.3. *InSitu* гамма-спектрометр BVK-1. Измерения содержания техногенных гамма-излучающих радионуклидов в грунте.

- обнаружение ТИ и оценка его характеристик могут проводиться как во время движения автомобиля, так и при его остановке;
- алгоритмы обнаружения ТИ нечувствительны к пространственным или временным изменениям естественного радиационного фона;
- возможно оперативное представление информации о поиске ТИ и оценке его характеристик непосредственно в процессе измерений.

Гамма-спектрометрический алгоритм обнаружения ТИ основан на анализе пространственной динамики параметра «критерий присутствия ТИ – нормализованный спектральный индекс *NSI*», который вычисляется путем соответствующей обработки аппаратурного спектра и устроен таким образом, что его значение возрастает при регистрации гамма-излучения ТИ и остается постоянным при увеличении/уменьшении естественного фона.

При движении автомобиля по обследуемой территории значение индекса *NSI* и его полная погрешность вычисляются для каждого вновь измеренного спектра, что позволяет непосредственно в процессе измерений разделять спектры на два класса: к первому относятся спектры, в которых нет гамма-излучения ТИ (фоновые спектры),

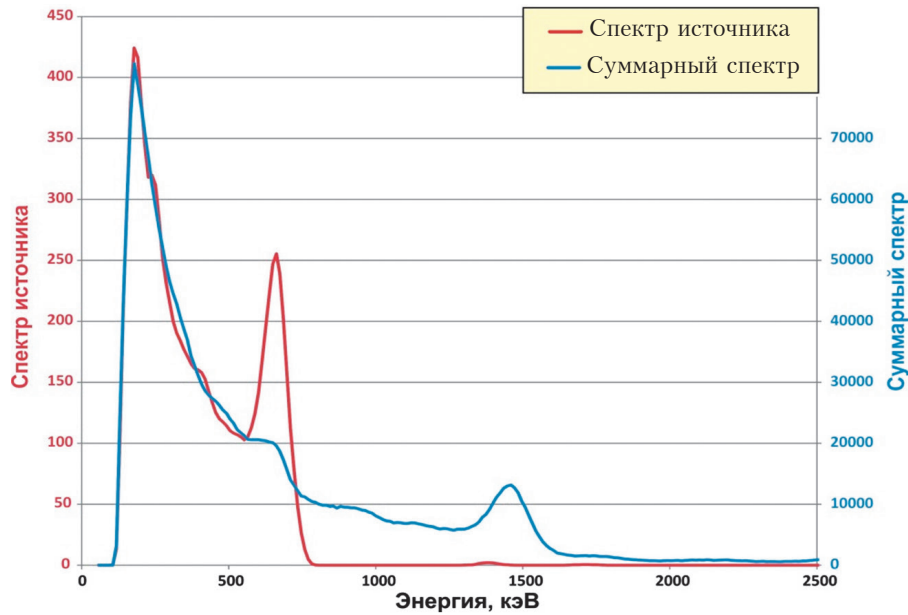


Рис. 4.
Выделение спектра ТИ из полного спектра для идентификации ТИ.

а ко второму – спектры, в которых присутствует гамма-излучение ТИ. Соответственно, спектры, попадающие во второй класс, характеризуются бóльшим значением индекса *NSI* по сравнению со спектрами, относящимися к первому классу. Группа последовательных спектров с повышенными относительно фоновых спектров значениями индекса *NSI* – с учетом полных погрешностей сравниваемых величин – трактуется как обнаружение ТИ. Координатная привязка каждого спектра в группе позволяет определять координаты обнаруженного таким образом ТИ.

Автоматически вычисляемые в процессе гамма-съемки местности значения индекса *NSI* отображаются на экране ПК в виде профиля *NSI* вдоль траектории движения автомобиля, что позволяет визуально контролировать обнаружение ТИ по максимумам в профиле *NSI* и корректировать, при необходимости, маршрут поездки.

Соответствующая обработка группы последовательных спектров с повышенными значениями индекса *NSI*, т. е. спектров, в которых присутствует гамма-излучение ТИ, позволяет выделить из них аппаратный спектр ТИ,

что позволяет, в свою очередь, однозначно идентифицировать обнаруженный ТИ (рис. 4).

Необходимо подчеркнуть, что в обсуждаемой ситуации вклад гамма-излучения ТИ в полный аппаратный спектр мал, в чем не сложно убедиться, сравнив отсчеты в полном аппаратном спектре (правая вертикальная ось на рис. 4) и выделенном из него аппаратном спектре ТИ (левая вертикальная ось на рис. 4). Соответственно, процедура выделения аппаратного спектра ТИ в этой ситуации далеко нетривиальная и может быть успешно выполнена только с помощью специализированных методов обработки и анализа спектрометрических данных.

Представленные выше методы реализованы в двух взаимодействующих в процессе измерений программ *SMS Na Avto* и *SAS Na Avto*. Программа *SMS Na Avto* обеспечивает всестороннее функционирование гамма-спектрометра, а программа *SAS Na Avto* – обработку и представление результатов измерений.

2.4. Применение *In-Situ* гамма-спектрометра ВВК-1

Достаточно очевидно, что по результатам одних только «обнаружительных» измерений

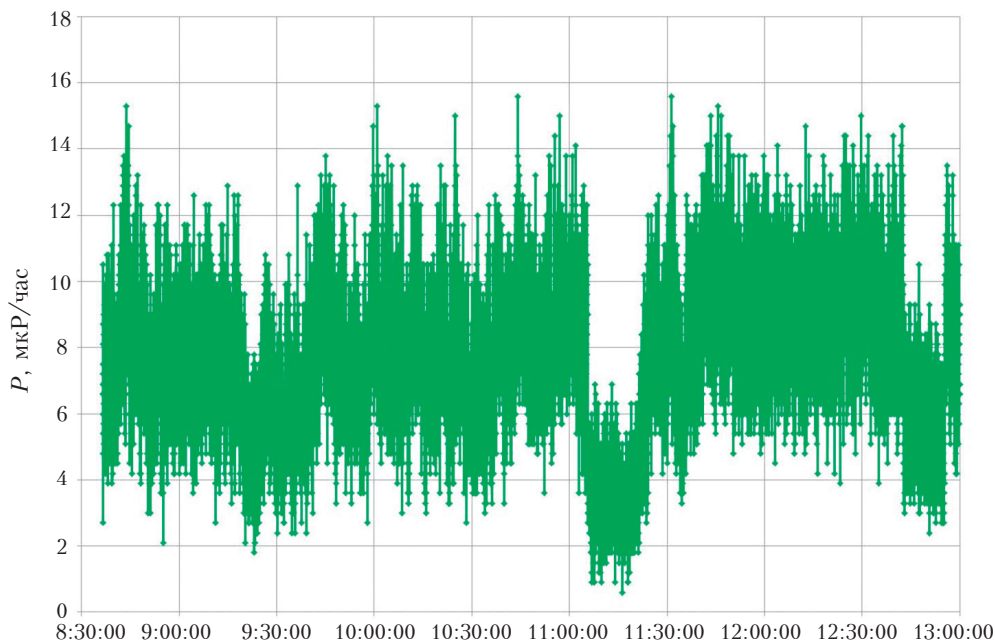


Рис. 5.
04.06.2019 г.
Профиль
мощности
дозы, мкР/ч.

значения активности найденных ТИ, в силу неопределенности измерительной геометрии, могут быть оценены весьма приближенно.

Поэтому представляется целесообразным дополнять «обнаружительные» измерения *In-Situ* гамма-спектрометрическими измерениями в точках обследуемой территории, представляющих интерес, в частности, в точках с большими значениями параметра *NSI*.

In-Situ гамма-спектрометр ВВК-1 (рис.3) предназначен для безпробоотборного определения содержания гамма-излучающих радионуклидов в грунте [6,7].

Реализованная в спектрометре ВВК-1 технология принципиально отличается от существующих тем, что обеспечивает практическую возможность определять характеристики загрязнения непосредственно из измеряемых спектров без привлечения какой-либо априорной информации о загрязнении и вспомогательного отбора проб грунта. Технология особенно эффективна для местности с достаточно сильным заглублением радионуклидов в грунт, приводящим к существенному поглощению гамма-излучения и делающим обяза-

тельным учет поглощения при вычислении значений активности [6,7].

Реализованная в аттестованной методике (N 6568/03-RA.RU.311703-2019) процедура *In-Situ* измерений выглядит следующим образом:

- установка спектрометра ВВК-1 в интересующей точке местности и запуск измерения;
- контроль измерения по величинам запаса активности ТИ в грунте и ее погрешности, автоматически вычисляемые непосредственно в процессе измерения программно-методическим обеспечением спектрометра;
- остановка измерения по достижении приемлемого значения погрешности.

3. Основные результаты экспериментальных исследований с применением автомобильного гамма-спектрометра

На рис.5 и 6 представлены профили мощности дозы вдоль маршрутов двух поездок автомобиля-лаборатории в окрестностях г. Киреевск. В этих профилях отсутствуют какие-либо максимумы, которые можно было бы интерпретировать как обнаружение ТИ

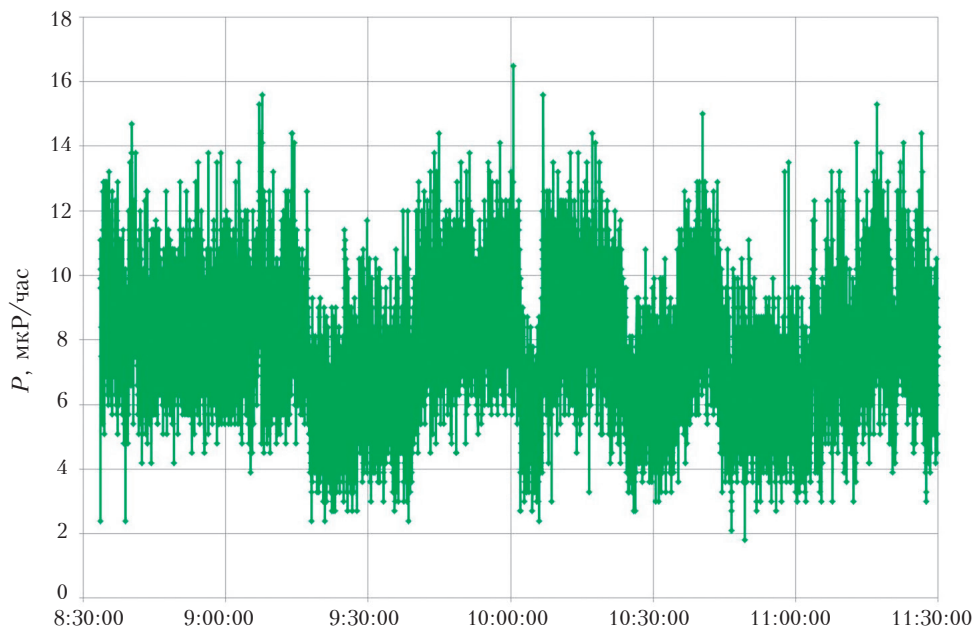


Рис. 6.
06.06.2019 г.
Профиль
мощности
дозы, мкР/ч.

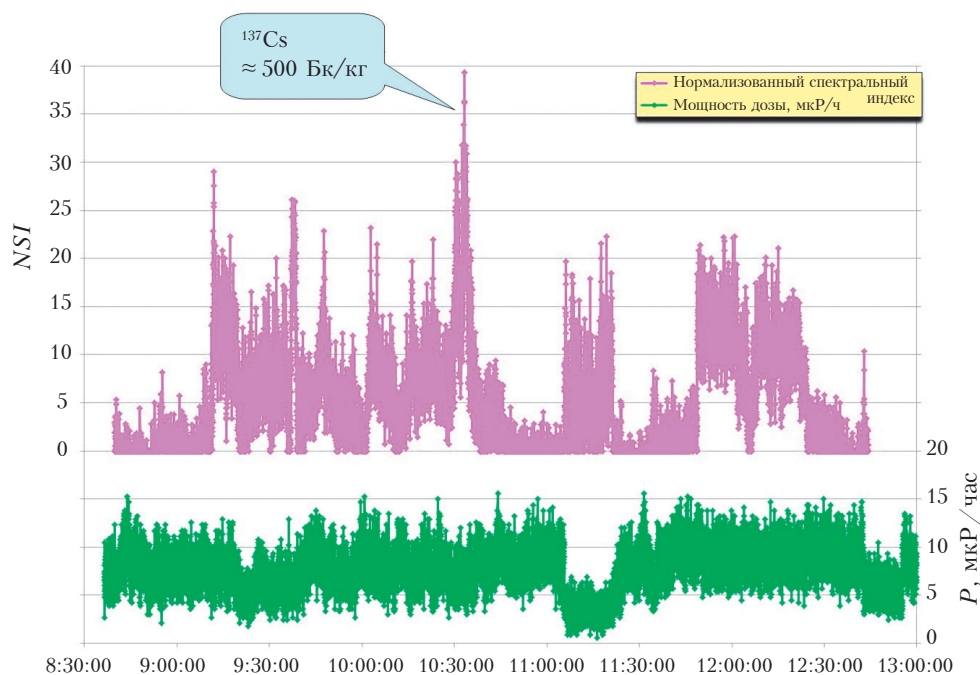


Рис. 7.
04.06.2019 г.
Профили NSI
и мощность
дозы.

или аномалий естественного/техногенноизмененного фона. Иными словами, измерение пространственной структуры мощности дозы не позволило обнаружить на обследованной территории каких-либо ТИ.

На рис. 7 и 8 представлены те же профили мощности дозы, совмещенные с профилями параметра NSI . В профилях параметра NSI имеется несколько максимумов со значени-

ями далеко за 10, которые сформированы реакцией параметра NSI на гамма-излучение ТИ, мимо которых перемещается автомобиль. На рис. 4 показан аппаратный спектр ТИ, выделенный из полного аппаратного спектра (п. 2.3), соответствующего одному из максимумов. Показанный спектр ТИ позволяет однозначно идентифицировать обнаруженный ТИ как ^{137}Cs .

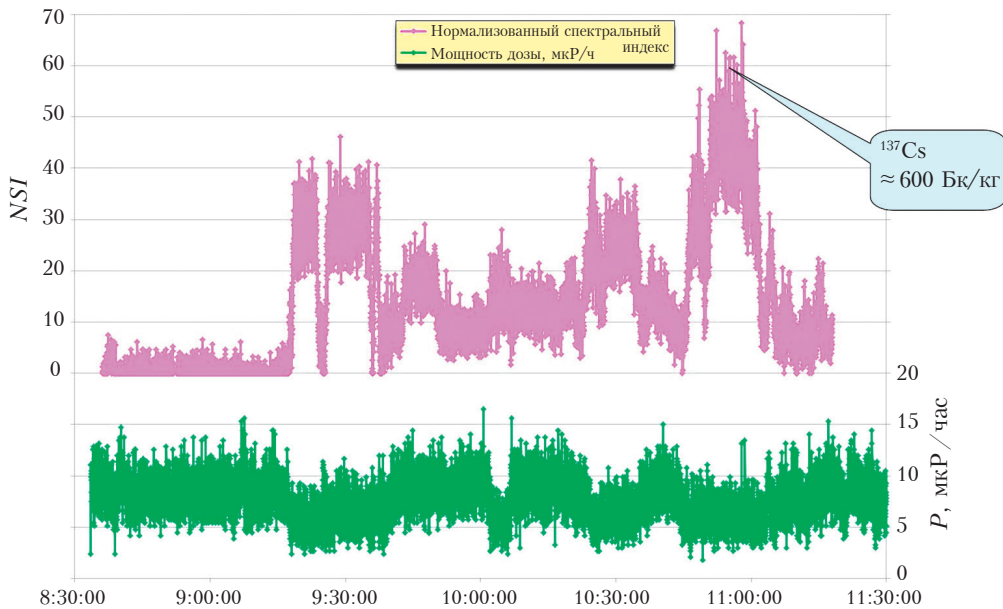


Рис.8.
06.06.2019 г.
Профили NSI
и мощность
дозы.

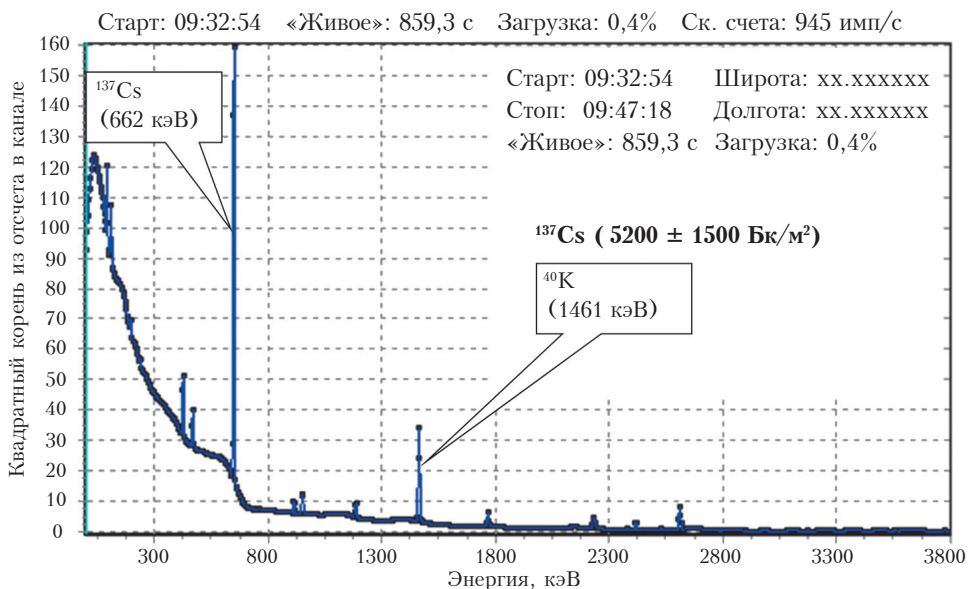
В некоторых точках с большими значениями параметра *NSI* были проведены измерения с помощью *In-Situ* гамма-спектрометром ВВК-1 (рис.3). Измеренная в одной из таких точек за ≈ 15 минут с погрешностью $\approx 30\%$ величина запаса радионуклида ^{137}Cs в грунте составила ≈ 5200 Бк/м² (рис.9).

С целью контроля результатов «обнаружительных» и *In-Situ* гамма-спектрометрических измерений был выполнен лабораторный *HPGe* гамма-спектрометрический радионуклидный

анализ проб грунта, отобранных в точках с большими значениями параметра *NSI*. Полученные значения удельной активности радионуклида ^{137}Cs в диапазоне 400–600 Бк/кг подтверждают корректность «обнаружительных» и *In-Situ* гамма-спектрометрических измерений.

При решении практических задач радиационного контроля местности результаты измерений мощности дозы и критерия *NSI* целесообразно представлять в виде карт мощности

Рис.9.
Пример
измерения и
обработки
In Situ-
спектра
на спектроме-
тре ВВК-1.



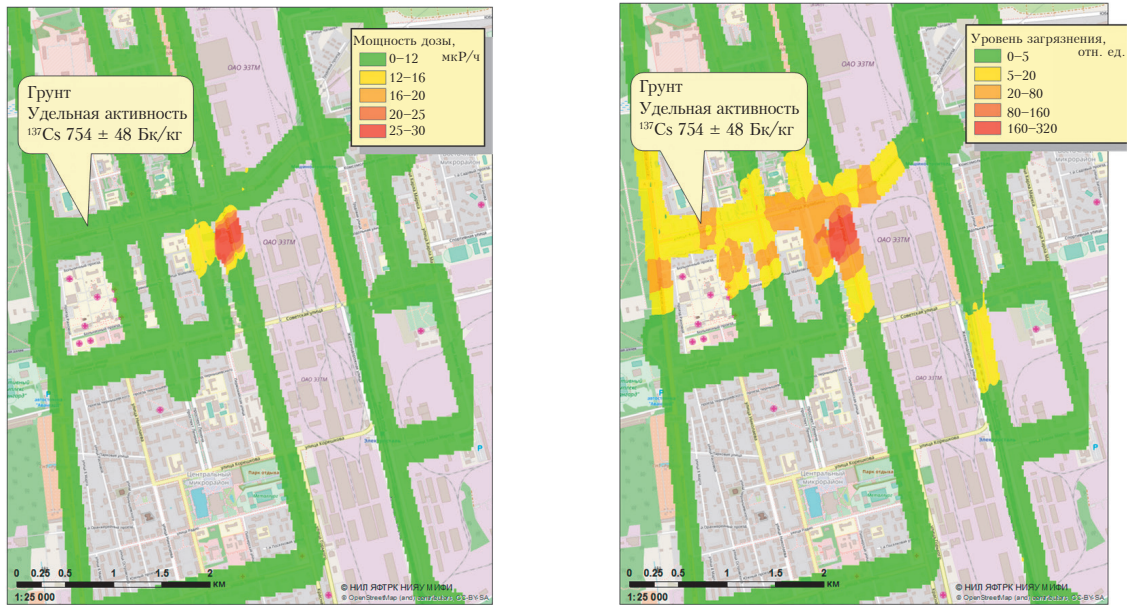


Рис.10. Карты мощности дозы и спектрометрического критерия присутствия техногенного источника гамма-излучения *NSI* вследствие загрязнения территории г. Электросталь радионуклидом ^{137}Cs по состоянию на 20 июня 2013 г.

дозы и критерия *NSI*. На рис.10 показаны такие карты для центральной части г. Электросталь, загрязненной в результате радиационной аварии на ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения» в апреле 2013 г. [8]. Указанное на карте значение удельной активности радионуклида $^{137}\text{Cs} \approx 750$ Бк/кг получено в результате лабораторного *HPGe* гамма-спектрометрического анализа пробы грунта. Таким образом, в данных условиях дозиметрический подход не позволяет «увидеть» ТИ такого класса, что не дает возможности корректно обнаруживать загрязненные участки местности, многократно занижая, в данном случае, площадь «грязной» территории.

Представленные результаты однозначно показывают, что гамма-спектрометрические технологии поиска ТИ и определения их характеристик принципиально превосходят дозиметрический подход. Создание дозиметрических технологий поиска ТИ с характеристиками, близкими к характеристикам гамма-спектрометрического подхода, в принципе не представляется возможным.

Описанный подход к автомобильной гамма-съемке местности находится в НИЛ ЯФТРК на уровне отработанной технологии. При этом готовность к выполнению измерений может быть обеспечена не более, чем через двое суток с момента принятия решения о выполнении работ. Согласно документу «СТО 1.1.1.01.001.0875-2017 Автоматизированная система контроля радиационной обстановки атомной электростанции. Технические требования», автомобильная лаборатория радиационной разведки является фрагментом АСКРО АЭС. Таким образом, представленные результаты можно интерпретировать как достаточно убедительное экспериментальное подтверждение возможности принципиального улучшения характеристик АСКРО АЭС за счет применения гамма-спектрометрических технологий. Ключевым элементом таких технологий являются специализированные методы обработки и анализа гамма-спектрометрических данных.

Литература

1. Дровников В.В., Егоров М.В. и др. Высокоэффективные аэрогамма-спектрометрические технологии поиска и идентификации техногенных источников гамма-излучения. Спектрометрический анализ и обработка данных на ПЭВМ. Сборник материалов 14 ежегодного семинара в ФГОУ «ГЦИПК». 19–23 ноября, 2007. С. 39-52.
2. Буряков В.Л., Даниленко К.Н., Егоров Н.Ю. и др. Радиационная безопасность подземных ядерных испытаний: оперативный радиационный контроль // Бюллетень ЦНИИАтомИнформ. N 3/93. С. 74-78.
3. Дровников В.В. и др. Итоговый научно-технический отчет по НИР «Спарта». М.: МИФИ, 2007.
4. Дровников В.В. и др. Разработка аэрогамма-спектрометрических технологий поиска и идентификации техногенных радиоактивных источников. URL: http://www.radiation.ru/publications/Airborne_technologies_development.pdf (дата обращения: 04.04.2022).
5. Дровников В.В. и др. Поиск и определение характеристик радиоактивных источников методами дистанционной гамма-спектрометрии. Труды научной сессии МИФИ-2010, М., 2010. С. 129-132.
6. Дровников В.В. и др. In Situ гамма-спектрометрические технологии с принципиально новыми возможностями // Сборник материалов Седьмой международной научно-технической конференции МНТК-2010 «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». М., 2010.
7. Дровников В.В. и др. In situ сцинтилляционная гамма-спектрометрия с принципиально новыми возможностями. Некоторые результаты исследования содержания естественных и техногенных радионуклидов в грунте // АНРИ. 2011. N 1(64). С. 56-64.
8. Дровников В.В. и др. Загрязнение территории г. Электросталь радионуклидом ^{137}Cs (по состоянию на 20 июня 2013 г.). Экспресс-отчет НИЛ ЯФТРК. М.: МИФИ, 2013.

Advanced Gamma-Spectrometry Methods Application for the Carborne Radiation Survey in the NPP Vicinity

Drovnikov Victor, Egorov Nikita, Zhivun Valery, Kadushkin Aleksander, Kovalenko Victor (National Research Nuclear University «Moscow Engineering Physics Institute» Nuclear Radiation Monitoring Laboratory, Moscow, Russia)

Abstract. The results of application of gamma-spectrometric technologies for carborne radiation survey in the NPP vicinity are presented [1-7]. The methods presented were developed at Nuclear Radiation Monitoring Laboratory, Moscow Engineering Physics Institute. The methods presented were developed at Nuclear Radiation Monitoring Laboratory, Moscow Engineering Physics Institute. The principal feature of the methods developed is that no prior information about any gamma-emitting source characteristics (radionuclide combination, etc.) and radiation background data are to be used for sources localization and identification. The methods can be applied when the car is moving and under conditions of strong spatial variations in the radiation background. The gamma-spectrometric methods developed are fundamentally ahead of the dosimetric ones in terms of sensitivity and information content. The special methods for gamma-spectrometric data processing and analyzing were developed and implemented in the SMS Na Avto software and SAS Na Avto software.

Key words: *automated system for monitoring the radiation situation at NPP, gamma-spectrometry carborne survey, gamma-emitting artificial sources search and detection, dose rate, carborne gamma-spectrometer, in-situ gamma-spectrometer, artificial gamma-emitting nuclide presence criterion NSI, SMS Na Avto software, SAS Na Avto software.*

В.В.Дровников (с.н.с.), Н.Ю.Егоров (с.н.с.), В.М.Живун (к.ф.-м.н., с.н.с.), А.В.Кадушкин (н.с.), В.В.Коваленко (к.ф.-м.н., в.н.с.) – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» НИЯУ МИФИ, Лаборатория «Ядерно-физические технологии радиационного контроля» НИЛ ЯФТРК, г. Москва.

Контакты: тел. +7 (495) 323-91-04; e-mail: egorov@radiation.ru.