

Применение гамма-спектрометрических технологий в автомобильной гамма-съемке местности.

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

Различными нормативными документами Концерна «Росэнергоатом» предусматривается выполнение автомобильной гамма-съемки местности в окрестностях АЭС, в т.ч. 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 разделе «Введение» этого документа говорится:

«.....на АС установлены СЗЗ – до 3 км и ЗН – до 30 км, в которых организован контроль и мониторинг радиационной обстановки проводимый:
.....»

- в неавтоматизированном режиме методом пробоотбора (в том числе с использованием передвижных радиометрических лабораторий) с измерением радиоактивности отобранных проб в лаборатории радиационного контроля АС (содержание радионуклидов в атмосферных выпадениях, почве,).

Далее, в этом же документе говорится:

«...в стандарте в виде приложений приведены разработанные ФГБУ «НПО «Тайфун».....требования к передвижным радиометрическим лабораториям,....»

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;.....».

Заметим, что в перечне оборудования ПРЛ (пункт «Г.1.2 В состав ПРЛ должны входить:») аппаратура для выполнения гамма-съемки местности отсутствует при том, что гамма-съемка названа задачей № 1 в перечне задач, которые должны решать ПРЛ.

Далее этот промах исправлен и 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 неэффективен для «поиска локальных зон радиоактивного загрязнения и источников ионизирующего излучения» в окрестностях АЭС, **при ее нормальной эксплуатации.**

Специалистами НИЛ ЯФТРК был проведен демонстрационный эксперимент задачей которого являлось сравнение возможностей дозиметрического и гамма-спектрометрического подходов к проведению автомобильной гамма-съемки местности на предмет обнаружения ее участков с повышенным содержанием техногенных гамма-излучающих радионуклидов.

Эксперимент был проведен в июне 2019 г. в окрестностях г. Киреевск Тульской области, умеренно загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. В рамках проведенных измерений загрязнение вокруг г. Киреевск имитировало загрязнение местности в окрестностях нормально функционирующей АЭС.

2. Аппаратурное и методическое обеспечение эксперимента.

Гамма-съемка местности выполнялась с помощью установленного на автомобиле Mitsubishi Outlander XL аппаратурно-методического комплекса, включавшего в себя:

- Дозиметр-радиометр СРП-68 с детектором NaI (рисунок 1).
- Автомобильный гамма-спектрометр (рисунок 2).
- **In-Situ** гамма-спектрометр ВВК-1 (рисунок 3).
- Персональный компьютер в защищенном промышленном исполнении.
- Дополнительный GPS-приемник.

Ниже дается краткое описание составных частей комплекса.

2.1. Дозиметр-радиометр СРП-68.

2.1.1. В обсуждаемых измерениях дозиметр-радиометр СРП-68 с детектором NaI (рисунок 1) применяется как аналог дозиметров ДМГ-01, БДКГ-24 (см. Таблицу Г.1 документа СТО 1.1.1.01.001.0875-2017).

2.1.2. Прибор СРП-68 был соответствующим образом доработан, а именно:

- измеряемые один раз в секунду значения мощности дозы сразу же передаются в персональный компьютер.
- к этому же персональному компьютеру подключается GPS-приемник, т.о. каждому измеренному значению мощности дозы приписываются соответствующие координаты и время.
- измеряемые значения мощности дозы могут быть отображены на экране компьютера в виде профиля мощности дозы вдоль траектории движения автомобиля или карты непосредственно в процессе измерений.
- получаемые данные (мощность дозы, координаты, время) могут быть переданы в другие программы для совместной обработки с данными от автомобильного гамма-спектрометра (см. раздел 2.2).

2.1.3. Описанные выше доработки обеспечивают возможность сравнивать пространственную структуру мощности дозы с пространственной структурой данных от автомобильного гамма-спектрометра (см. раздел 2.2).

2.2. Автомобильный гамма-спектрометр.

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

2.2.1. Состав спектрометра.

2.2.1.1. Спектрометрический модуль (СМ), включающий:

- блок регистрации гамма-излучения с детектором NaI большого объема;
- цифровой спектрометрический процессор, совмещенный с источником высоковольтного питания;
- одноплатный компьютер PCI-104;
- аккумуляторное питание;
- GPS-приемник;
- беспроводной интерфейс Wi-Fi;
- система температурного демпфирования/обогрева детектора NaI;
- виброразвязывающая платформа;
- средства дистанционного управления СМ;
- контейнер СМ.

2.2.1.2. Персональный компьютер (ПК) в защищенном промышленном исполнении с собственным монитором и встроенным беспроводным интерфейсом Wi-Fi для связи с СМ.

2.2.1.3. Вспомогательное оборудование:

- дополнительный GPS-приемник;
- портативный маршрутизатор Wi-Fi;
- резервные аккумуляторы;
- зарядное устройство для СМ;
- видеорегистраторы.

2.2.1.4. Программное обеспечение функционирования гамма-спектрометра «Na **Avto** Spectra Measuring System» - **SMS Na Avto**.

2.2.1.5. Программное обеспечение обработки и представления результатов измерений «Na **Avto** Spectra Analysis System» - **SAS Na Avto**.

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

2.2.2.1. Спектры измерялись и накапливались в циклическом режиме, т.е. набор спектра в течение 1 секунды, его запись за время много меньше 1 секунды, набор следующего спектра в течение 1 секунды, его запись и т.д. Так при скорости движения автомобиля 36 км/час каждый спектр оказывается «привязанным» с помощью GPS-приемника к участку маршрута длиной ~ 10 метров.

Понятно, что чем ниже скорость движения автомобиля со спектрометром, тем выше чувствительность поиска и лучше его пространственное разрешение.

2.2.2.2. Обнаружение ТИ с помощью программы **SAS Na Avto** основано на обработке набора последовательных спектров (см. п. 2.2.2.1). В результате обработки каждого спектра для него вычисляется значение специального параметра «критерий присутствия ТИ - нормализованный спектральный индекс **NSI**».

Параметр **NSI** «устроен» таким образом, что его значение возрастает при попадании в детектор излучения ТИ, а на увеличение естественного фона параметр **NSI** не реагирует.

Во время перемещения автомобиля со спектрометром по обследуемой территории автоматически вычисляется и отображается на экране ПК профиль **NSI** вдоль траектории движения автомобиля. Соответственно, когда автомобиль проезжает мимо ТИ, то в профиле **NSI** возникает максимум, интерпретируемый как обнаружение ТИ.

2.2.2.3. Обычно при автомобильной гамма-съемке в максимуме профиля **NSI** присутствует несколько точек, соответствующих нескольким последовательно измеренным спектрам, в которых присутствует излучение ТИ. Соответствующая обработка этих спектров позволяет выделить из них спектр ТИ и однозначно этот ТИ идентифицировать (рисунок 4).

2.2.2.4. Возможности спектрометра в части обнаружения ТИ:

- обнаружение ТИ обеспечивается в реальном времени, т.е. непосредственно в процессе измерений;
- обнаружение ТИ при движении и остановке автомобиля;
- оперативное представление информации о поиске и обнаружении ТИ в виде зависимости величины **NSI** от текущего времени или координат автомобиля;
- нечувствительность алгоритмов обнаружения ТИ к аномалиям естественного фона;
- обнаружение ТИ проводится без использования какой-либо априорной информации о характеристиках ТИ;
- обнаружение ТИ проводится без использования априорной информации о фоновых характеристиках местности, на которой проводятся измерения.

2.2.2.5. Возможности в части определения характеристик обнаруженных ТИ.

- определение радионуклидного состава обнаруженных ТИ;
- определение координат обнаруженных локальных ТИ;
- определение пространственной структуры протяженных ТИ.

2.3. *In-Situ* гамма-спектрометр ВВК-1.

2.3.1. *In-Situ* гамма-спектрометр ВВК-1 (рисунок 3) предназначен для безпробоотборного определения содержания гамма-излучающих радионуклидов в грунте.

Реализованная в спектрометре ВВК-1 технология принципиально отличается от существующих тем, что обеспечивает практическую возможность определять характеристики загрязнения непосредственно из измеряемых спектров без привлечения без использования 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 обязательным учет поглощения при вычислении значений активности.

Более подробно о разработанном в НИЛ ЯФТРК спектрометре ВВК-1 можно прочитать здесь:

http://www.radiation.ru/publications/In_situ_gamma_spectroscopy_with_basically_new_abilities.pdf

2.3.2. Основные моменты функционирования *In-Situ* гамма-спектрометра в составе автомобильного комплекса.

2.3.2.1. Достаточно очевидно, что значения активности ТИ, обнаруженных с помощью автомобильного гамма-спектрометра, в силу неопределенности измерительной геометрии могут быть определены по результатам «обнаружительных» измерений только приближенно.

2.3.2.2. Поэтому представляется целесообразным дополнять «обнаружительные» измерения *In-Situ* гамма-спектрометрическими измерениями в точках, представляющих интерес. Например, в точках с максимальными значениями параметра **NSI**.

2.3.2.3. Реализованная в *In-Situ* гамма-спектрометре ВВК-1 измерительная технология выглядит следующим образом:

- установка спектрометра ВВК-1 в интересующей точке местности;

- запуск измерения;
- контроль измерения по величинам запаса активности ТИ в грунте и ее погрешности, вычисляемым непосредственно в процессе измерения соответствующим программно-методическим софтом;
- останов измерения по достижении приемлемого значения погрешности.

3. Некоторые результаты.

3.1. Эксперимент состоял из следующих частей:

- измерения спектров и мощности дозы в движении автомобиля при помощи автомобильного гамма-спектрометра и прибора СРП-68, соответственно;
- *In-Situ* гамма-спектрометрические измерения при помощи спектрометра ВВК-1 в различных точках маршрута; в т.ч. в точках с максимальными значениями параметра **NSI**;
- отбор проб грунта в различных точках маршрута; в т.ч. в точках с максимальными значениями параметра **NSI**, для их последующего лабораторного HPGe гамма-спектрометрического анализа;
- лабораторный HPGe гамма-спектрометрический анализ отобранных проб грунта.

3.2. На рисунках 5 и 6 представлены профили мощности дозы вдоль двух маршрутов в окрестностях г. Киреевск. Эти профили характеризуются отсутствием в них каких-либо локальных или протяженных максимумов, которые можно было бы интерпретировать как движение автомобиля с дозиметром мимо ТИ локального или протяженного.

Т.о. измерение пространственной структуры мощности дозы не позволило обнаружить на обследованной территории каких-либо техногенных источников гамма-излучения.

3.3. На рисунках 7 и 8 представлены те же профили мощности дозы с наложенными на них соответствующими профилями параметра **NSI**. В профилях параметра **NSI** имеется несколько максимумов со значениями далеко за 10, которые сформированы реакцией параметра **NSI** на гамма-излучение техногенных источников, мимо которых перемещается автомобиль. На рисунке 9 показан спектр ТИ, выделенный соответствующим образом из полного спектра. Спектр ТИ позволяет однозначно идентифицировать обнаруженный ТИ как ^{137}Cs .

3.4. В некоторых точках с большими значениями параметра **NSI** были проведены измерения с помощью *In-Situ* гамма-спектрометр ВВК-1 (рисунок 3). На рисунке 10 показаны результаты измерений в одной из таких точек, полученные непосредственно в процессе измерений. В результате измерения длительностью ~ 15 минут с погрешностью ~ 30% определен запас радионуклида ^{137}Cs в грунте.

Уточним порядок действий при таких измерениях: в интересующей нас точке местности спектрометр извлекается из автомобиля, устанавливается на треноге, запускается измерение, ход измерения и идущей параллельно обработки контролируется оператором. Когда отображаемая погрешность определения запаса активности станет приемлемой для оператора, то измерения заканчиваются с получением итогового, т.е. в принципе уже не требующего дополнительной обработки, результата.

3.5. В результате лабораторного HPGe гамма-спектрометрического радионуклидного анализа проб грунта, отобранных в точках с большими значениями параметра **NSI**, получены значения удельной активности радионуклида ^{137}Cs в диапазоне 400 – 600 Бк/кг.

4. Основные выводы.

Представленные результаты однозначно подтверждают, что спектрометрические методы автомобильной гамма-съемки местности принципиально превосходят по чувствительности и информативности дозиметрические методы.

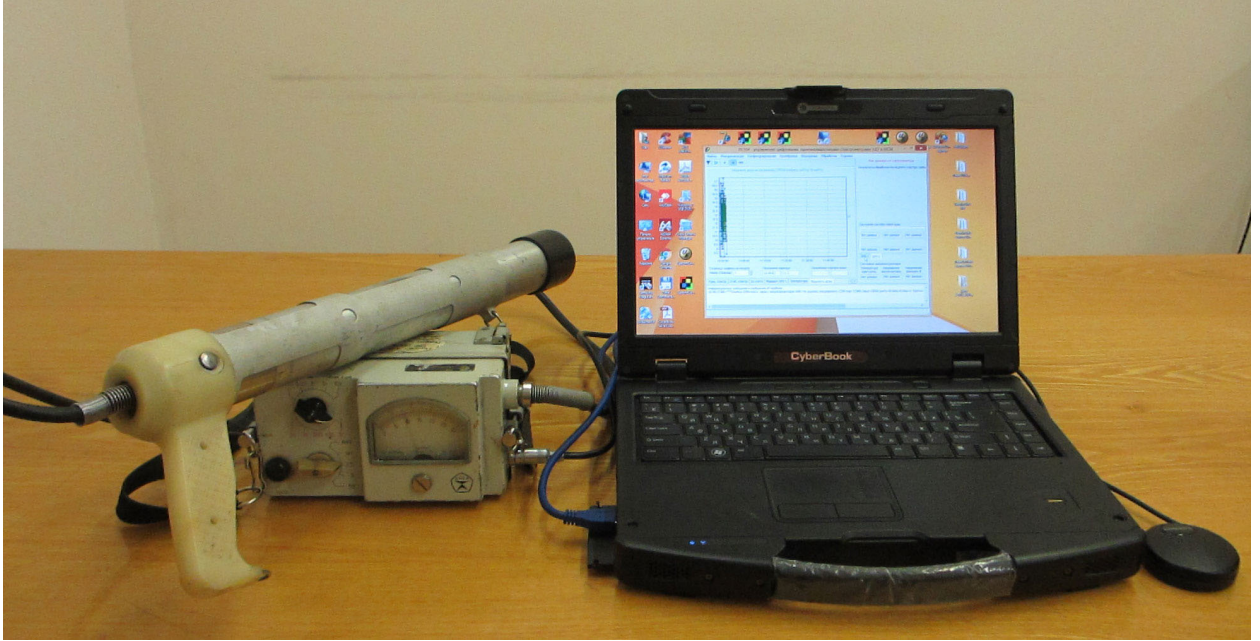


Рисунок 1. Дозиметр-радиометр СРП-68 с детектором NaI(Tl), подключенный к персональному компьютеру.



Рисунок 2. Размещение автомобильного гамма-спектрометра в задней части автомобиля Mitsubishi Outlander XL для проведения гамма-съёмки местности. На крышке контейнера лежит внешний датчик навигации Garmin GPS 18x 5Hz.



Рисунок 3. *InSitu* гамма-спектрометр ВVK-1. Измерения содержания техногенных радионуклидов в грунте.

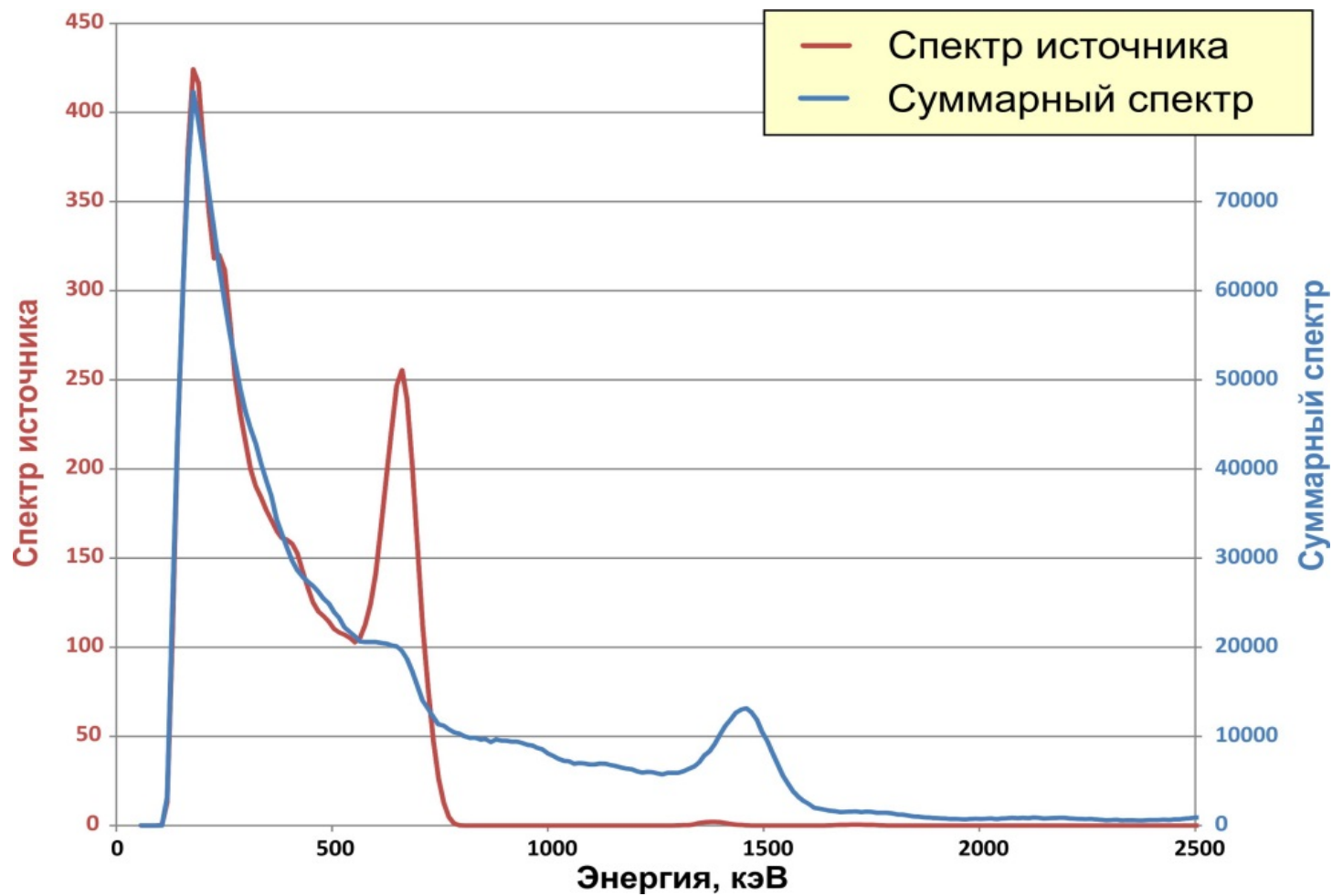


Рисунок 4. Выделение спектра ТИ из полного спектра для идентификации ТИ.

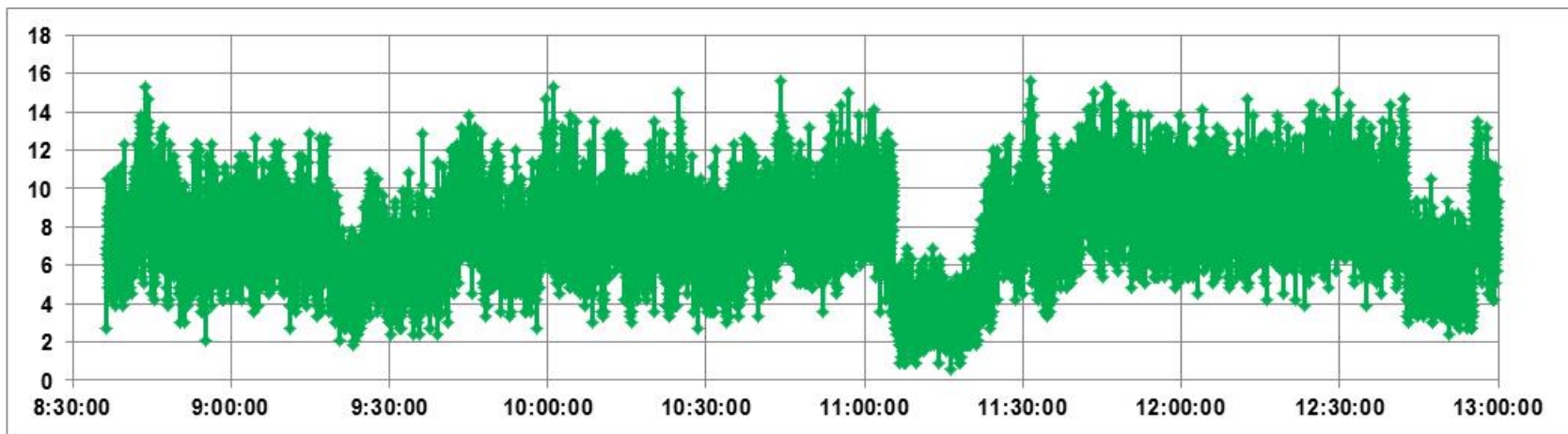


Рисунок 5. 04.06.2019 г. Мощность дозы, мкР/ч.

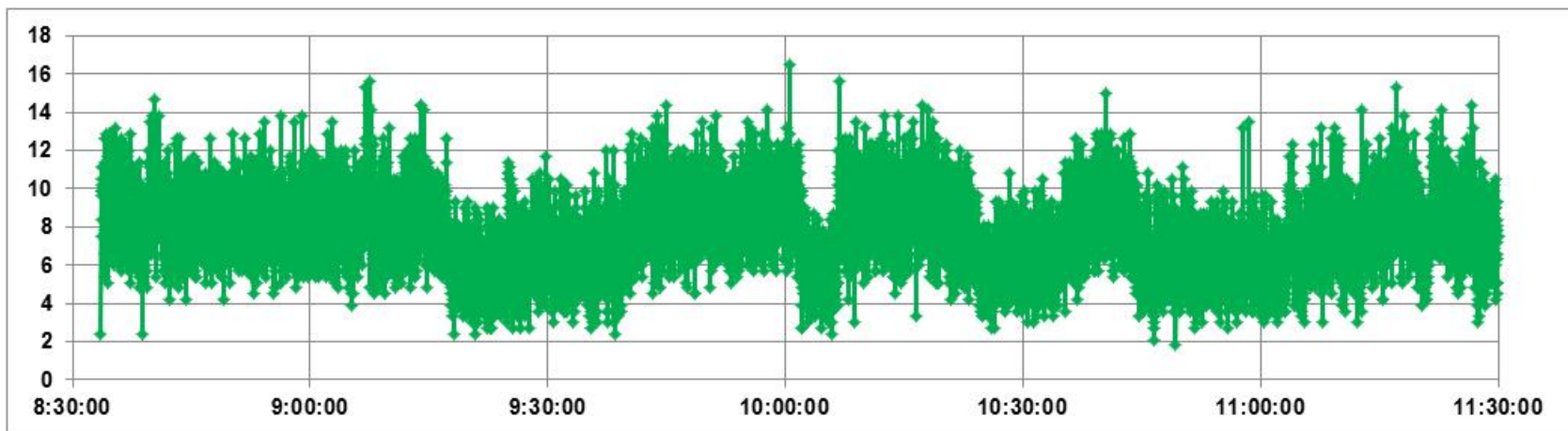


Рисунок 6. 06.06.2019 г. Мощность дозы, мкР/ч.

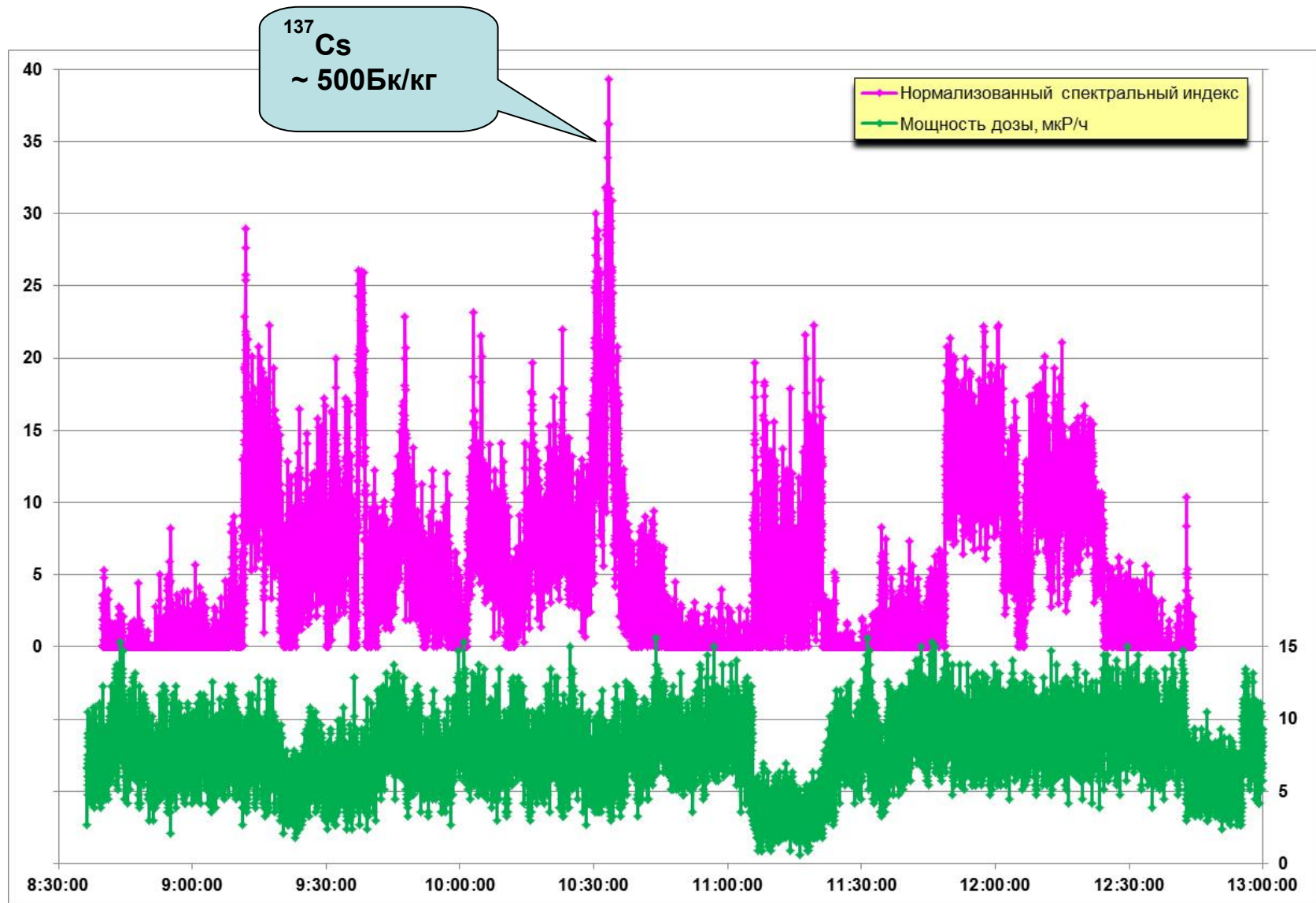


Рисунок 7. 04.06.2019 г. NSI и мощность дозы

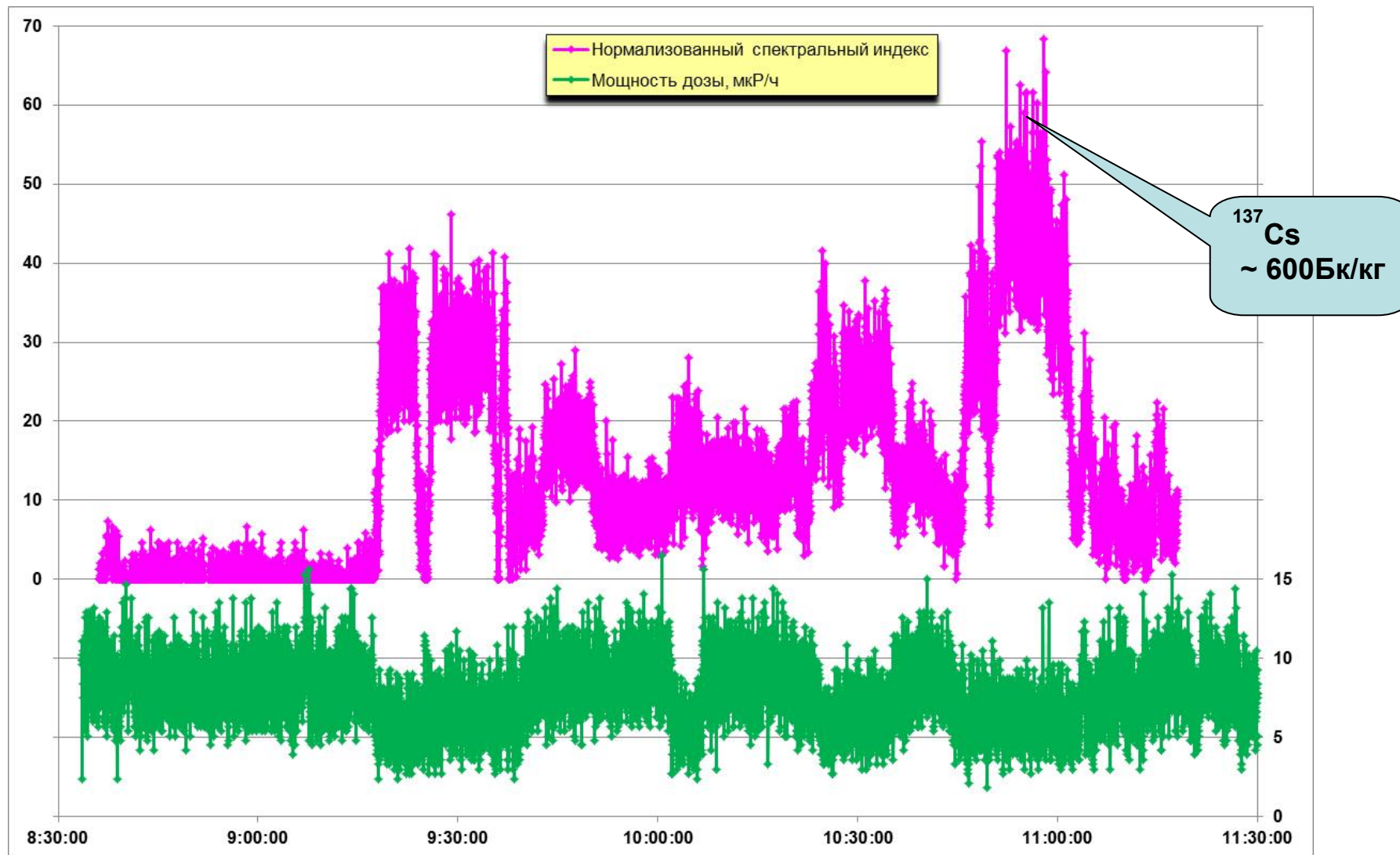


Рисунок 8. 06.06.2019 г. NSI и мощность дозы

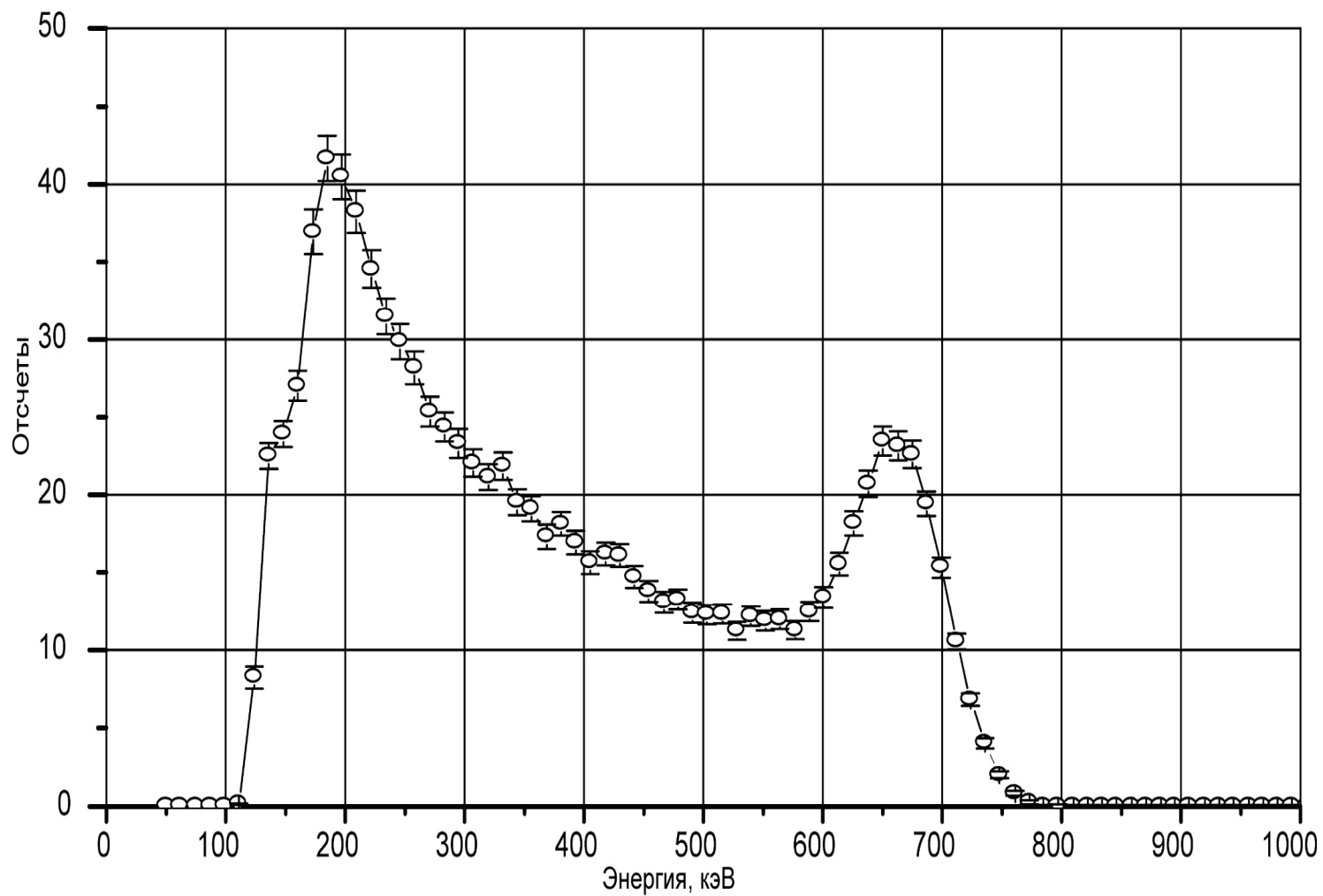


Рисунок 9. Выделение спектра ТИ из полного спектра для идентификации ТИ. Выделенный спектр ТИ соответствует одному из максимумов на профилях критерия NSI на рисунках 7 и 8. Обнаруженный ТИ идентифицируется как ^{137}Cs .

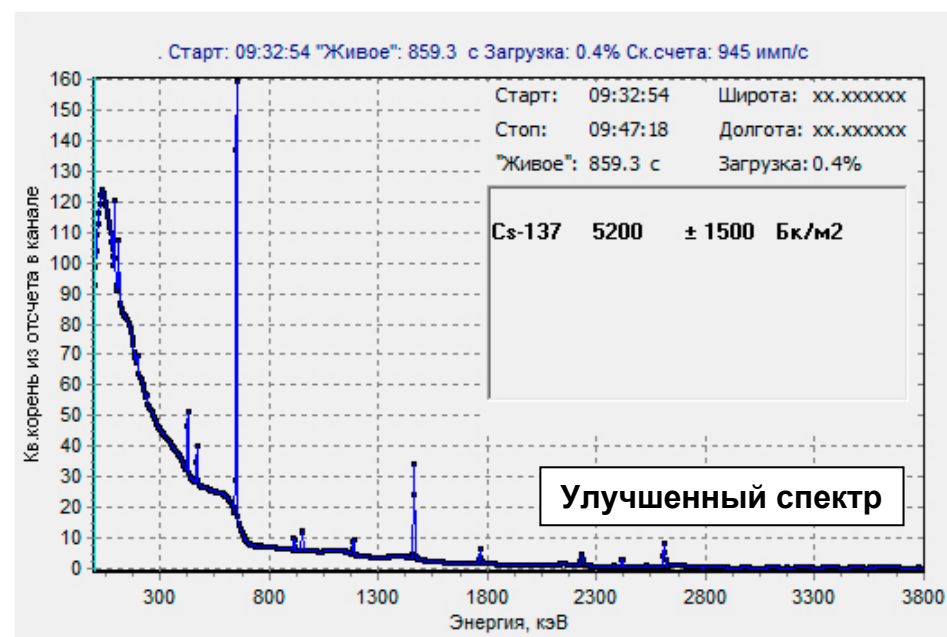


Рисунок 10. Пример измерения и обработки спектра *In Situ*