

## Разработка аэрогамма-спектрометрических технологий поиска и идентификации техногенных радиоактивных источников.

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

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

\* - Для контактов : Тел.: (903) 210-23-59, (495) 788-56-99 доб. 8463.

Адрес электронной почты: [egorov@radiation.ru](mailto:egorov@radiation.ru), Web-адрес: [www.radiation.ru](http://www.radiation.ru)

Использование сцинтилляционных детекторов NaI(Tl) или CsI(Tl) в подавляющем большинстве современных аэрогамма-спектрометров обусловлено их относительно низкой стоимостью, простотой и надежностью в эксплуатации, а также хорошо отработанными приемами построения больших регистрирующих поверхностей.

Однако, анализ результатов современных аэрогамма-спектрометрических экспериментов со сцинтилляционными детекторами указывает на то, что используемые методы обработки информации оказываются малоэффективными применительно к поиску техногенных источников (ТИ) гамма-излучения вследствие их низкой чувствительности и существенно ограниченных возможностей идентификации таких источников. Практические же задачи применения аэрогамма-спектрометрии требуют использования таких методов обработки результатов измерений, которые обеспечивали бы возможность обнаружения и идентификации ТИ с высокой чувствительностью и при любом радионуклидном составе.

В связи с этим, нами были разработаны специализированные методы обработки результатов аэрогамма-спектрометрических измерений со сцинтилляционными детекторами и реализующее эти методы программное обеспечение, характеризуемые следующими основными возможностями:

- обнаружение источников гамма-излучения и определение их характеристик по результатам аэрогамма-спектрометрических измерений, выполненных на сцинтилляционных спектрометрах, **без использования** какой-либо априорной информации радионуклидном составе и других параметрах ТИ.
- обнаружение источников гамма-излучения практически с любым радионуклидным ТИ.
- совместный анализ результатов измерений, проводимых с различными типами детекторов гамма-излучений (например, сцинтилляционных и полупроводниковых), и измерений различных типов излучений (например, нейтронного и гамма-излучения).

В разработанных методах обнаружения и идентификации ТИ в качестве исходных данных используется следующий набор результатов полетных измерений – время и географические координаты начала и конца каждого измерения, высота полета для каждого измерения, живое время измерения и накопленный спектр. На основе этих данных методы позволяют определить:

- Величину критерия обнаружения (присутствия) ТИ для каждого измерения и пространственное распределение этого критерия по обследованной территории.
- Спектр гамма-излучения ТИ и его радионуклидный состав (идентификация ТИ).
- Величину скорости счета от ТИ в каждом измерении и распределение скорости счета по обследованной территории.

- Координаты и активность обнаруженного локального ТИ (или источников).
- Пространственное распределение активности протяженных ТИ.
- Погрешности выше перечисленных величин.

Возможности созданных методов демонстрируются на примере обработки результатов совместных экспериментов МИФИ и МосНПО «Радон», а также обработки первичных результатов аэрогамма-спектрометрических исследований, выполненных в других научных коллективах.

С помощью установленного на вертолете Ка-26 (МосНПО «Радон») аэрогамма-спектрометрического комплекса АГСК-99С МИФИ со сцинтилляционных NaI(Tl) детекторов объемом 12 литров были выполнены измерения над некоторыми районами Московской области. Полеты выполнялись методом параллельного галсирования, расстояние между галсами от 200 до 400 метров, средняя высота полета 100 метров, средняя скорость – 30 м/сек. Спектрометрическая информация накапливалась в виде списка «амплитуда-время». Координатная привязка результатов измерений проводилась на основании информации, получаемой приемником спутниковой системы позиционирования GPS-35-HVS. Для корректной локализации обнаруженных источников и определения их активности координатные данные уточнялись с помощью разработанными для этих целей в НИЛ ЯФТРК специальных программных средств.

В эксперименте 1 проводилось сравнение чувствительностей различных методов обнаружения локальных источников гамма-излучения. В качестве обнаруживаемого ТИ использовалось локальное радиоактивное загрязнение на площадке металлургического завода, находящегося южнее г. Подольск. На рис. 1-4 представлены профили обычно используемых для обнаружения ТИ величин мощности дозы, интегральной скорости счета, скорости счета в области малых энергий и «цезиевом окне» вдоль линии полета. Сравнение их с профилем разработанного нами критерия обнаружения ТИ (Рис. 5) позволяет утверждать, что критерий обнаружения ТИ существенно более информативен вследствие лучшего отношения «сигнал/шум».

Представленные в Таблице 1 значения относительных минимальных активностей локальных ТИ, обнаруживаемых различными методами, вычисленные на основании данных эксперимента 1, подтверждают этот вывод.

**Таблица 1. Оценки возможностей обнаружения источника различными методами.**

<b>Метод обнаружения ТИ</b>	<b>Критерий качества обнаружения</b>	<b>Минимальная относительная активность ТИ</b>
<b>1. Мощность дозы</b>	<b>9.5</b>	<b>1.0</b>
<b>2. Суммарная скорость счета</b>	<b>51</b>	<b>0.2</b>
<b>3. Скорость счета малых энергий</b>	<b>67</b>	<b>0.15</b>
<b>4. Скорость счета в Cs-окне</b>	<b>117</b>	<b>0.083</b>
<b>5. Критерий обнаружения ТИ (МИФИ)</b>	<b>324</b>	<b>0.03</b>

Заметим попутно, что для правильной установки границ энергетического окна, т.е. создания принципиальной возможности применения метода энергетических окон для поиска ТИ, необходимо заранее знать радионуклидный состав ТИ.

Для уточнения пространственной структуры обнаруженного на площадке завода ТИ был проведен эксперимент 2 с несколько измененной траекторией полета. На рис. 6 представлен профиль критерия обнаружения ТИ вдоль новой траектории, указывающий на

наличие на обследованной территории двух локальных источников. Оба источника были однозначно идентифицированы как  $^{137}\text{Cs}$  на основании их спектров гамма-излучения (Рис. 8), полученных из полетных данных (Рис. 7) с помощью разработанного метода. Метод позволил определить пространственное распределение загрязнения местности радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$ , провести локализацию максимумов ТИ и вычислить их активности. На Рис. 9 рисунке изображена пространственная структура обнаруженного ТИ, состоящего из двух пятен, совпадающих с положением завода вблизи населенного пункта Большое Толбино.

Для сравнения на Рис. 10 представлено пространственное распределение мощности дозы на обследованной территории, полученное по результатам того же эксперимента. В этом распределении помимо двух максимумов на территории завода присутствуют достаточно много дополнительных локальных максимумов в точках, где какие-либо ТИ отсутствуют. Т.е. в условиях техногенноизмененного радиационного фона (территория с городской и промышленной застройкой) достоверное обнаружение ТИ посредством измерения мощности дозы крайне неэффективно.

Определение активности обнаруженных ТИ проводится специально разработанным для аэрогамма-спектров методом пиков, позволяющим в реальных аэрогамма-спектрах определять скорости счета в пиках полного поглощения и их погрешности. В случае сцинтилляционных аэрогамма-спектров основными препятствиями в применении обычного метода пиков являются низкое энергетическое разрешение сцинтилляционных спектрометров, его сильная зависимость от энергии, слабая статистика накопленных в индивидуальных измерениях спектров и доминирующая в них непрерывная составляющая. Для устранения этих препятствий была разработана совокупность математических методов и реализующих их программных средств, позволяющая выполнять преобразования спектров, в результате которых ширина спектральных пиков существенно (в 2 – 3 раза) уменьшается. При этом оценка погрешностей активностей радионуклидов производится обычными статистическими методами.

Демонстрация работоспособности этого метода иллюстрируется обработкой сцинтилляционных спектров, полученных в измерениях над территориями с различным радионуклидным составом источников гамма-излучения:

- полет над территорией со значительным загрязнением поверхности радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  и обычным радионуклидным составом грунта (Рис. 11);
- полет над территорией со слабым загрязнением поверхности радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  и обычным радионуклидным составом грунта (Рис. 12).

Хорошо видно, что предложенный метод позволяет уверенно выделять пик полного поглощения, соответствующий радионуклиду  $^{137}\text{Cs}$  и корректно рассчитывать его активность при картировании территорий с относительно небольшим загрязнением указанным радионуклидом. Широко распространенный метод энергетических окон будет давать в этом случае заведомо неправильные результаты, т.к. в «цезиевое» окно будут попадать «паразитные» импульсы от регистрации гамма-излучений естественных радионуклидов  $^{232}\text{Th}$  (583 кэВ) и  $^{226}\text{Ra}$  (609 кэВ).

В эксперименте 3 исследовалась возможность применения сцинтилляционного аэрогамма-спектрометра для обнаружения, идентификации и локализации нескольких близко расположенных ТИ с перекрывающимися и достаточно сложными спектрами гамма-излучения. Источники были размещены на относительно небольшом расстоянии друг от друга, что обеспечивало при нахождении вертолета над каждым из источников регистрацию излучения от всех остальных источников, то есть «чистый» спектр каждого источника измерить было невозможно. Исследовалась также возможность совместной обработки спектров, измеренных с разных высот.

Полеты выполнялись параллельными галсами на эшелонах 100 м, 200 м и 300 м. Расстояние между галсами от 200 до 400 метров, средняя скорость 30 м/сек. Всего было измерено 1500 спектров; живое время измерения каждого спектра составило 3 сек.

Совместная обработка этих спектров разработанными нами методами позволила обнаружить на обследованной территории два источника гамма-излучения, выделить спектры каждого из них, идентифицировать их как  $^{152}\text{Eu}$  (источник 1) и  $^{60}\text{Co}$  (источник 2) (Рис.13-14), а затем определить их активности и координаты (Рис. 15). Вычисленные из экспериментальных данных значения активностей обнаруженных источников -  $15\pm 0.3$  ГБк для  $^{152}\text{Eu}$  и  $3.0\pm 0.6$  ГБк для  $^{60}\text{Co}$  - достаточно хорошо согласуются с их паспортными значениями: 19 ГБк для  $^{152}\text{Eu}$  и 2.2 ГБк для  $^{60}\text{Co}$ .

Для уточнения пространственной структуры обнаруженных ТИ был разработан метод восстановления пространственного распределения активности гамма-излучающих радионуклидов - метод МВПРГИ. В основе метода лежит создание физических моделей распространения излучения от источников различной конфигурации. Для сравнения на Рис. 16 представлены пространственные распределения активности радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  на обследованной территории, полученные из одного и того же исходного набора аэрогамма-спектрометрических данных стандартным методом энергетических окон (левый рисунок) и методом разработанным в МИФИ, без использования МВПРГИ (средний рисунок) и с его использованием (правый рисунок). Полученные с применением метода МВПРГИ результаты указывают на локальный характер источников, то есть, разрушения ампулы (контейнера), в которой находится обнаруженный источник, скорее всего не произошло. Такого рода информация необходима для планирования мероприятий по утилизации обнаруженных загрязнений. **Заметим также, что метод энергетических окон не позволил в этом эксперименте обнаружить относительно слабые загрязнения на севере и юге обследованной территории.**

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- Разработанные методы позволяют с высокой чувствительностью обнаруживать как точечные, так и распределенные ТИ, намного превосходя по этому параметру как метод энергетических окон, так и все остальные известные методы. Следует отметить, что превосходство разработанного метода будет возрастать при ухудшении фоновых условий.
- Разработанные методы позволяют обнаруживать и определять количественные характеристики гамма-источников со спектром любой степени сложности, включая непрерывный.
- В качестве результата предложенные методы дают полный аппаратный спектр гамма-излучения ТИ, что делает его идентификацию практически однозначной. При этом не используется никаких априорных данных о радионуклидном составе источника.
- Методы могут быть использованы в случаях, когда на обследуемом участке присутствуют два или больше ТИ с различными, в том числе и частично перекрывающимися спектрами гамма-излучения.

Таким образом, можно утверждать, что разработанный набор методов обработки превосходит все известные методы аналогичного назначения по параметрам обнаружения и идентификации ТИ различного радионуклидного состава.

Применение созданных методов для обработки экспериментальных результатов, полученных с помощью аэрогамма-спектрометра с характеристиками аналогичными АГСК-99С, позволят в реальных условиях (режимы полетов, время измерения, естественный и техногенный фон гамма-излучения и т.д.) без использования каких-либо априорных сведений о радионуклидном составе и других параметрах источника:

- Обнаруживать точечные (локальные) неэкранированные источники гамма-излучения с любым радионуклидным составом интенсивностью  $10^7$  квант/с и более, протяженные источники с плотностью поверхностной интенсивности  $10^7$  квант/км<sup>2</sup>/с и более; для радионуклида <sup>137</sup>Cs эти пороговые величины соответствуют значениям активности точечного неэкранированного источника 0.3 мКи ( $\sim 1.2 \times 10^7$  Бк) и плотности поверхностной активности 0.3 мКи/км<sup>2</sup> ( $\sim 12$  Бк/м<sup>2</sup>), соответственно.
- Идентифицировать практически любой радионуклидный состав источника.
- Определять характеристики источника (координаты точечного источника с точностью до 10 метров, активность с погрешностью не хуже  $5 \times 10^6$  квант/с).
- Определять пространственное распределение активности в обнаруженном источнике.

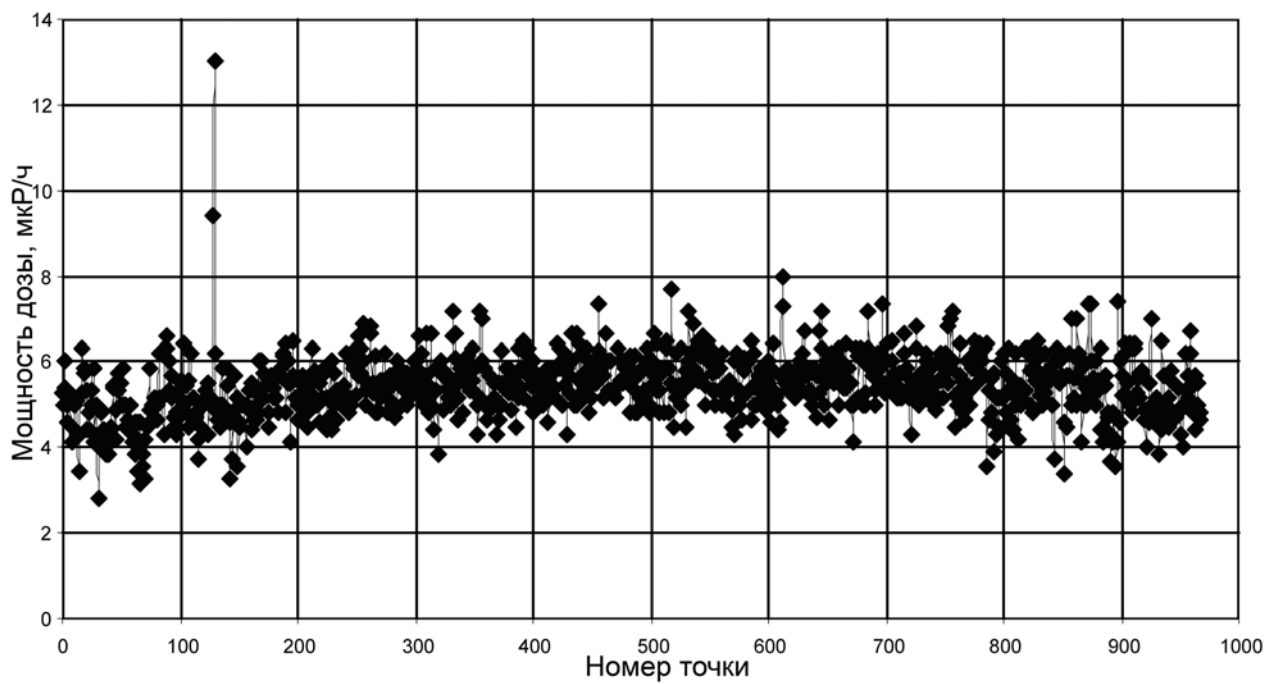


Рис.1 Профиль мощности дозы вдоль траектории полета в эксперименте 1.

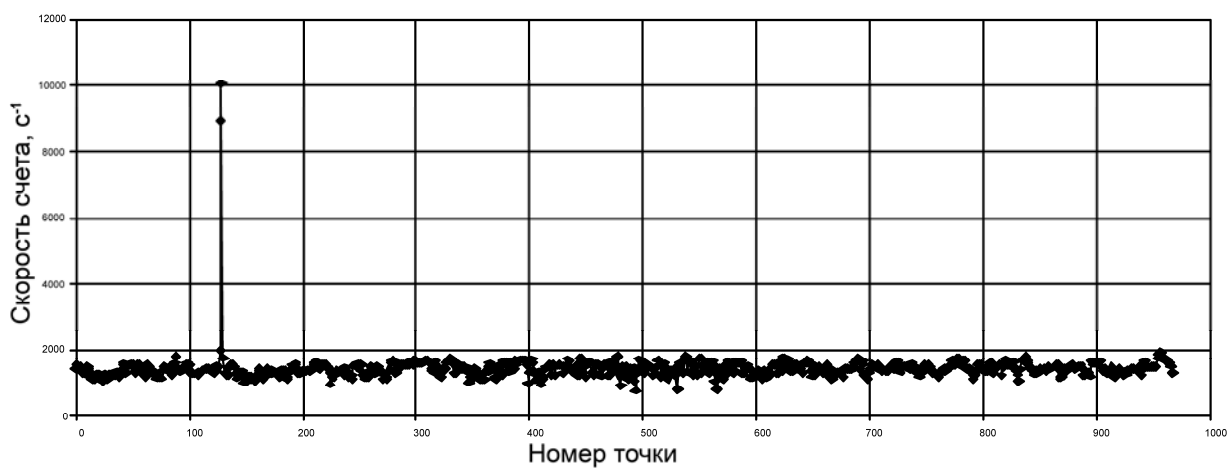


Рис.2 Профиль интегральной скорости счета вдоль траектории полета в эксперименте 1.

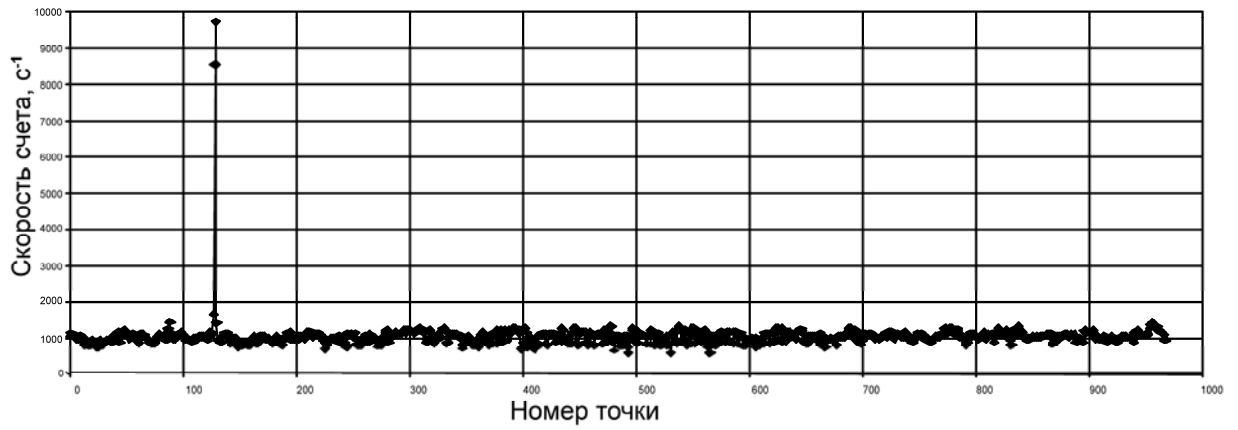


Рис.3 Профиль скорости счета в области малых энергий вдоль траектории полета в эксперименте 1.

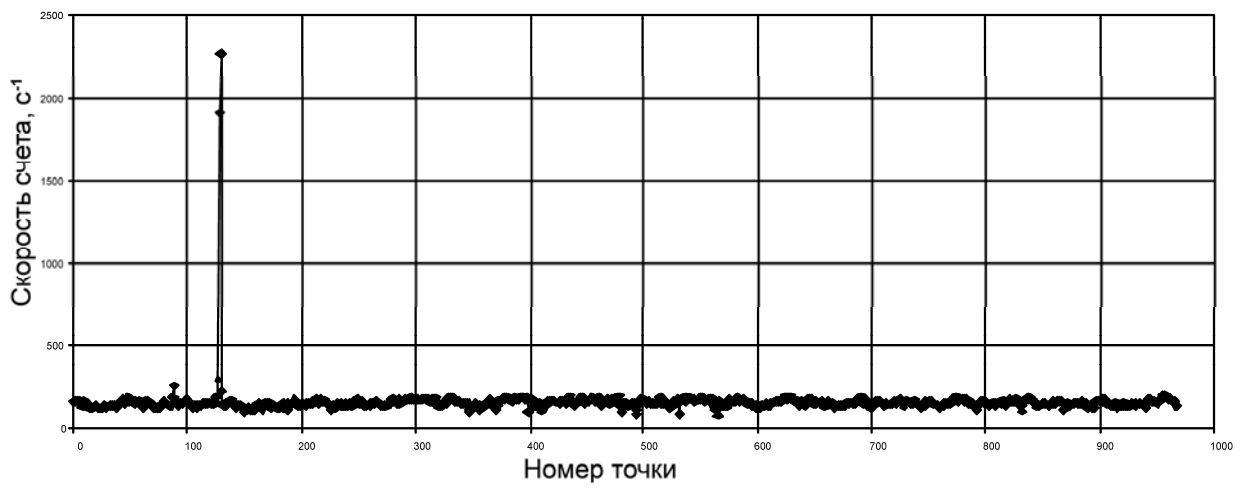


Рис.4 Профиль скорости счета в «цезиевом окне» вдоль траектории полета в эксперименте 1.

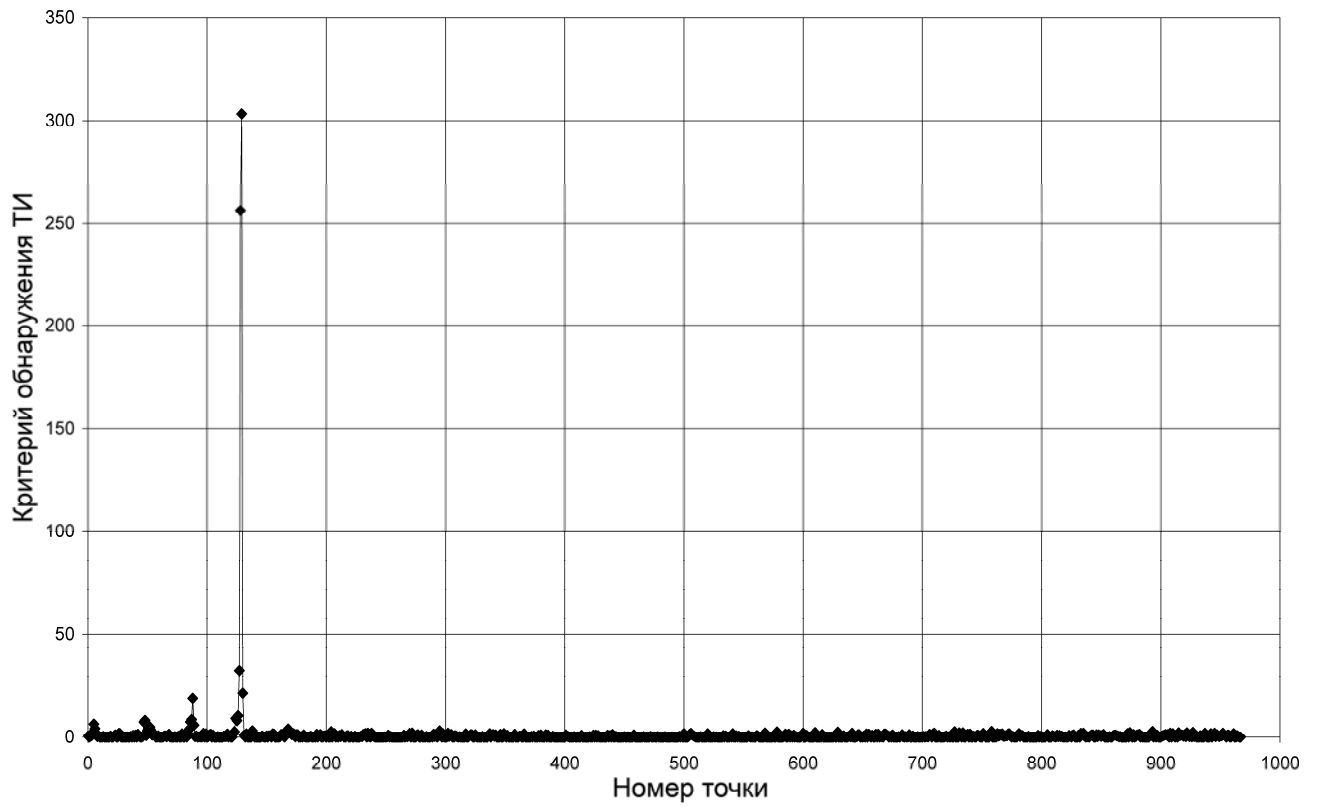


Рис.5 Профиль критерия обнаружения ТИ вдоль траектории полета в эксперименте 1.

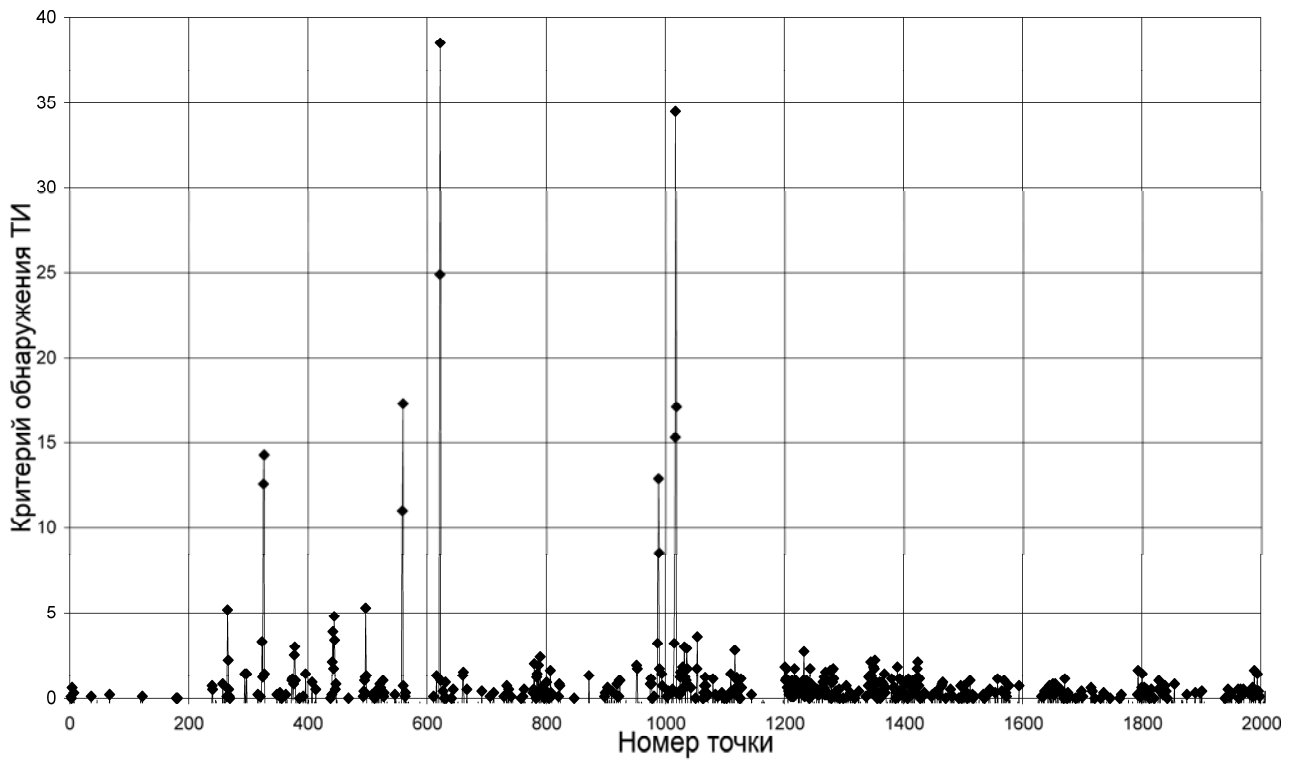


Рис.6 Профиль критерия обнаружения ТИ вдоль траектории полета в эксперименте 2.



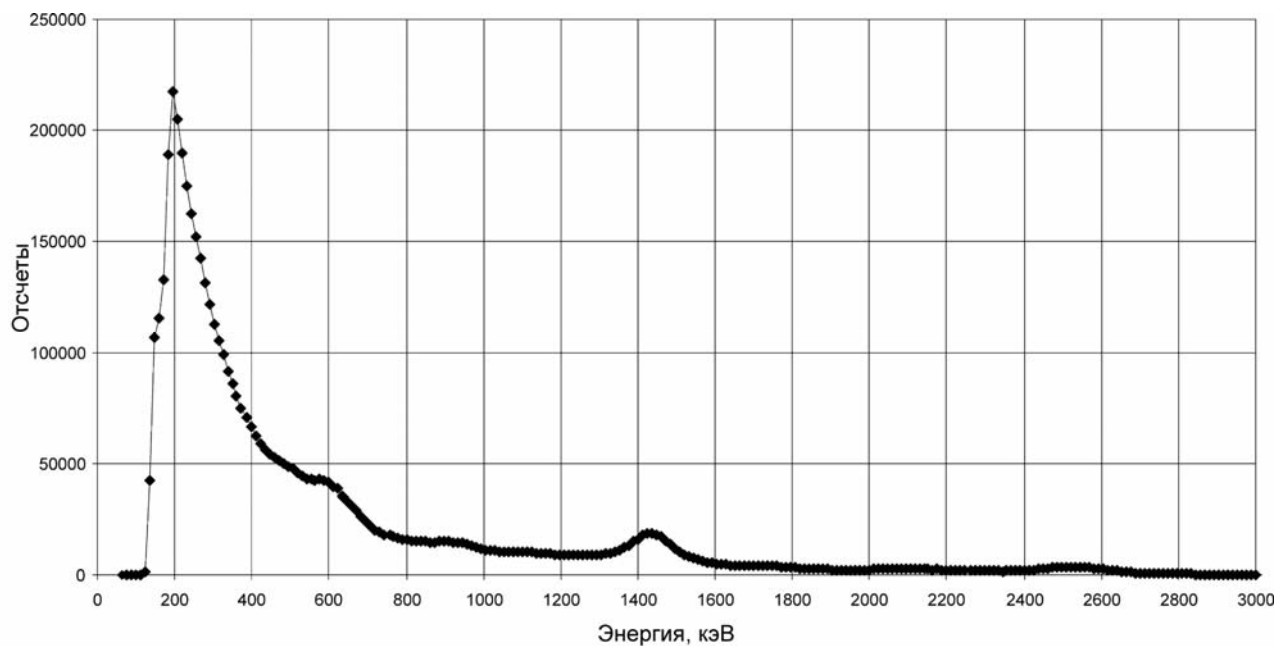


Рис.7 Суммарный спектр гамма-излучения, полученный в эксперименте 2 за все время измерений.

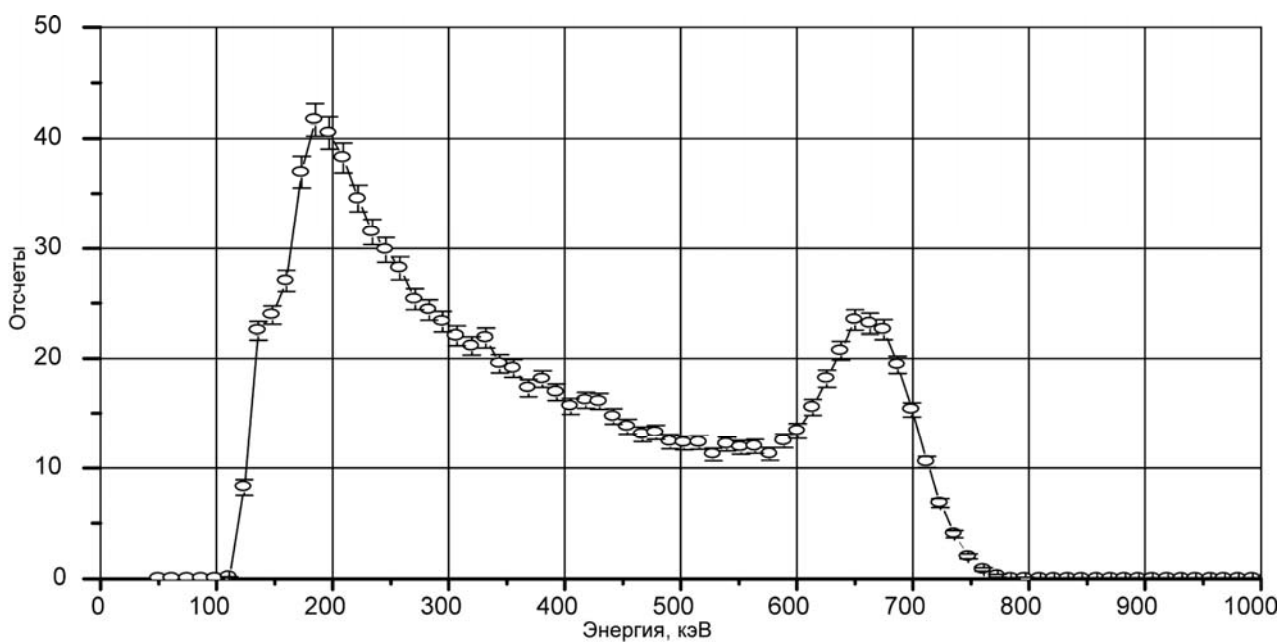


Рис.8 Идентификация обнаруженного в эксперименте 2 ТИ. Спектр гамма-излучения радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ , полученный из спектра, представленного на Рис. 7. Погрешность отсчетов в каналах представлена на уровне  $2\sigma$ .

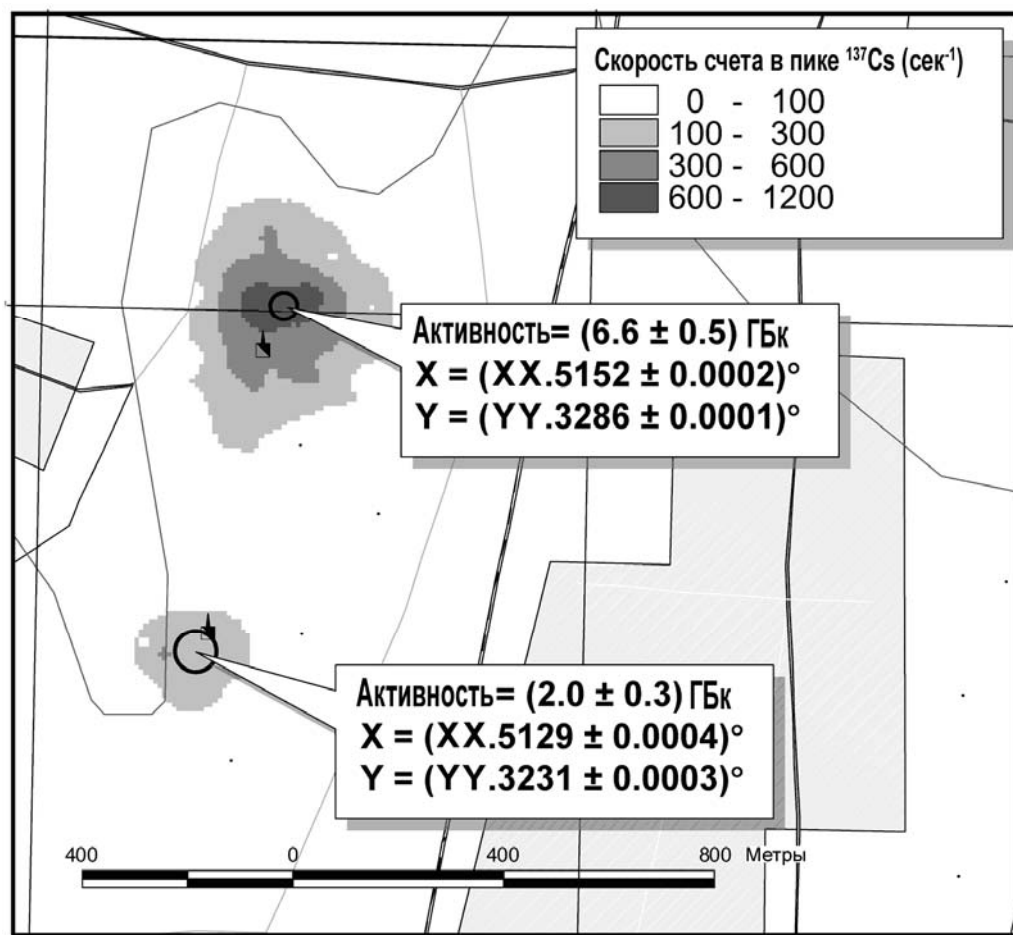


Рис.9 Локализация и определение активности обнаруженных в эксперименте 2 ТИ. Площадка завода. Район г. Подольск, Московская область.

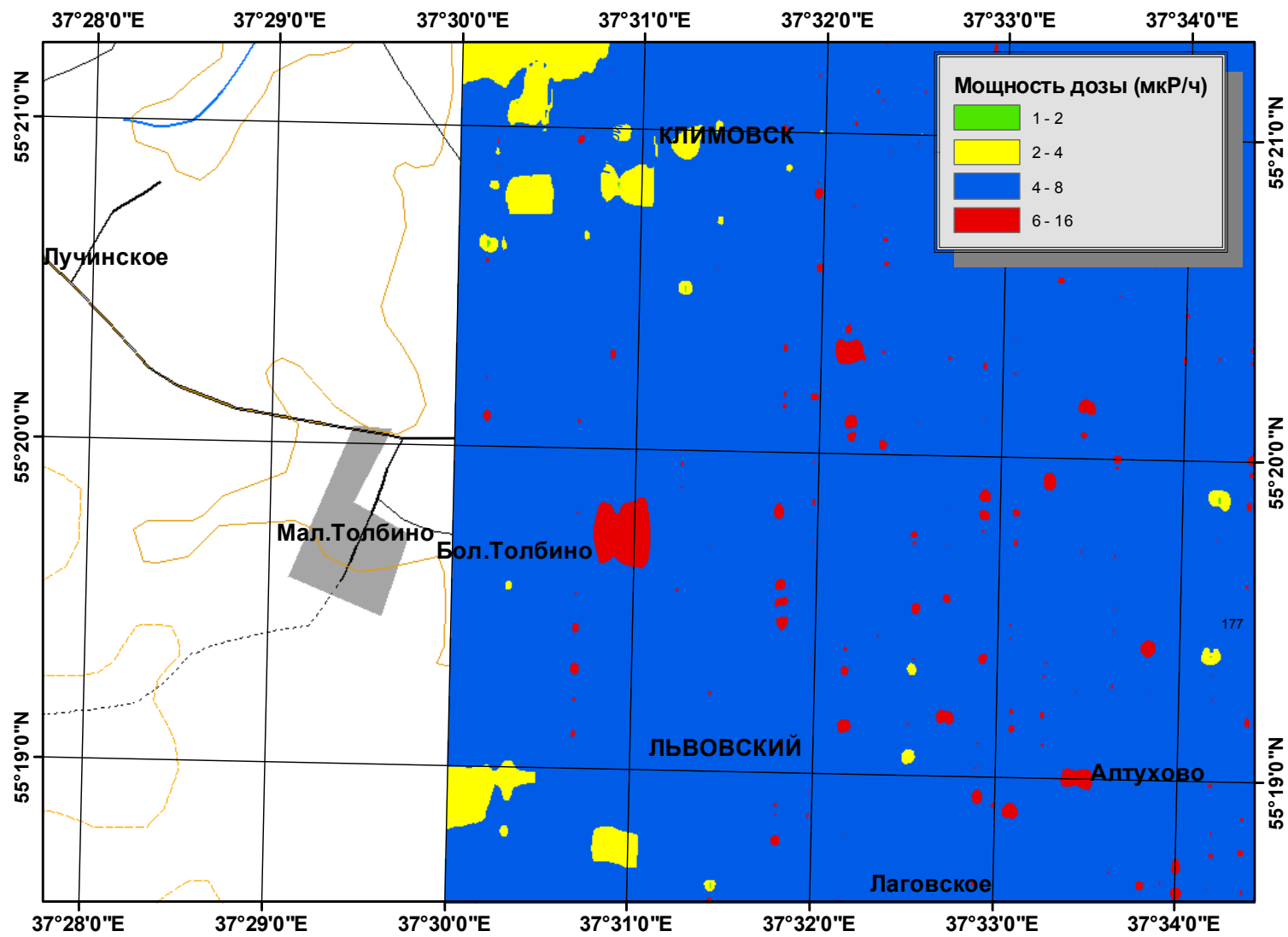


Рис.10 Пространственное распределение мощности дозы в районе г. Подольск (Московская область).

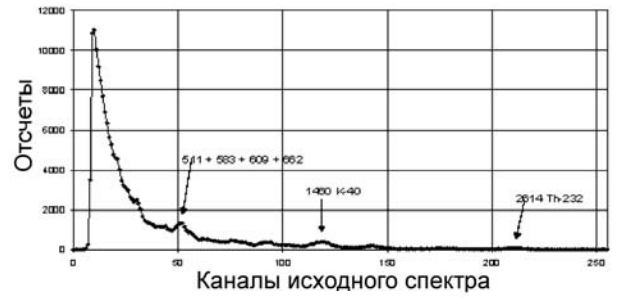
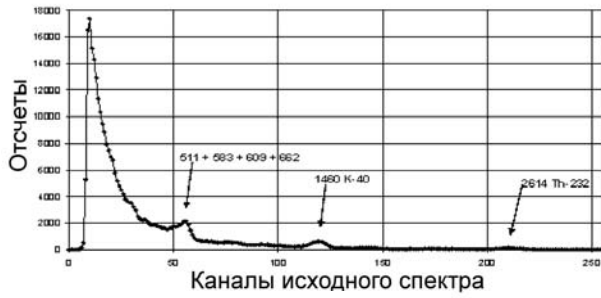


Рис.11 Измерения (полет) над территорией со значительным загрязнением радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  и обычным радионуклидным составом грунта. Исходный (аппаратурный) и преобразованный спектры.

Рис.12 Измерения (полет) над территорией с небольшим загрязнением радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  и обычным радионуклидным составом грунта. Исходный (аппаратурный) и преобразованный спектры.

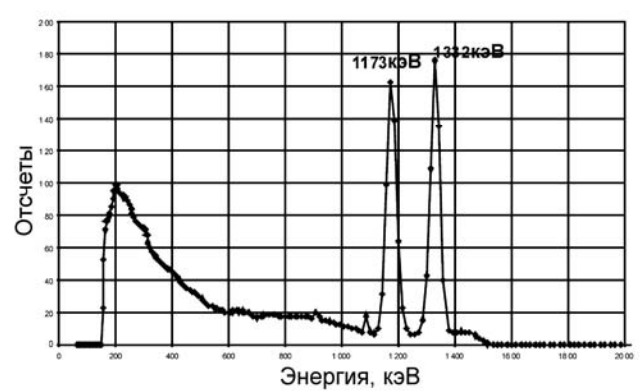
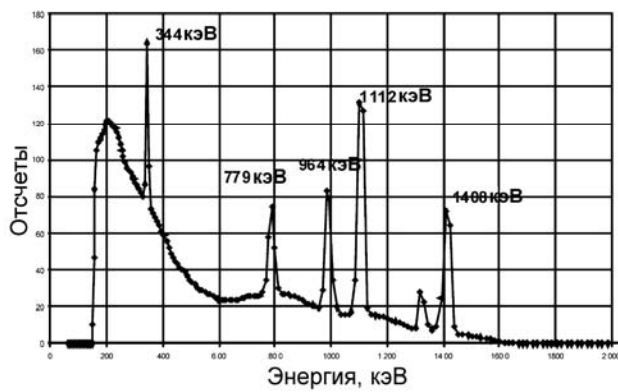
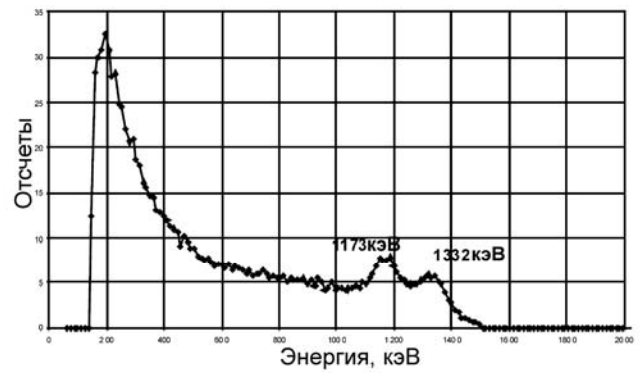
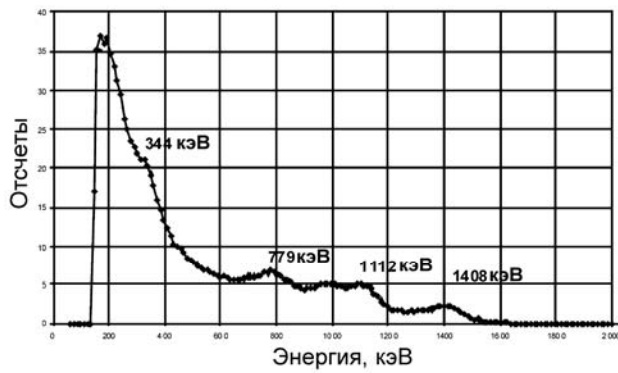


Рис.13 Идентификация обнаруженного источника в эксперименте 3. Выделенный из суммарного спектра и преобразованный спектры источника № 1 -  $^{152}\text{Eu}$ .

Рис.14 Идентификация обнаруженного источника в эксперименте 3. Выделенный из суммарного спектра и преобразованный спектры источника № 2 -  $^{60}\text{Co}$ .

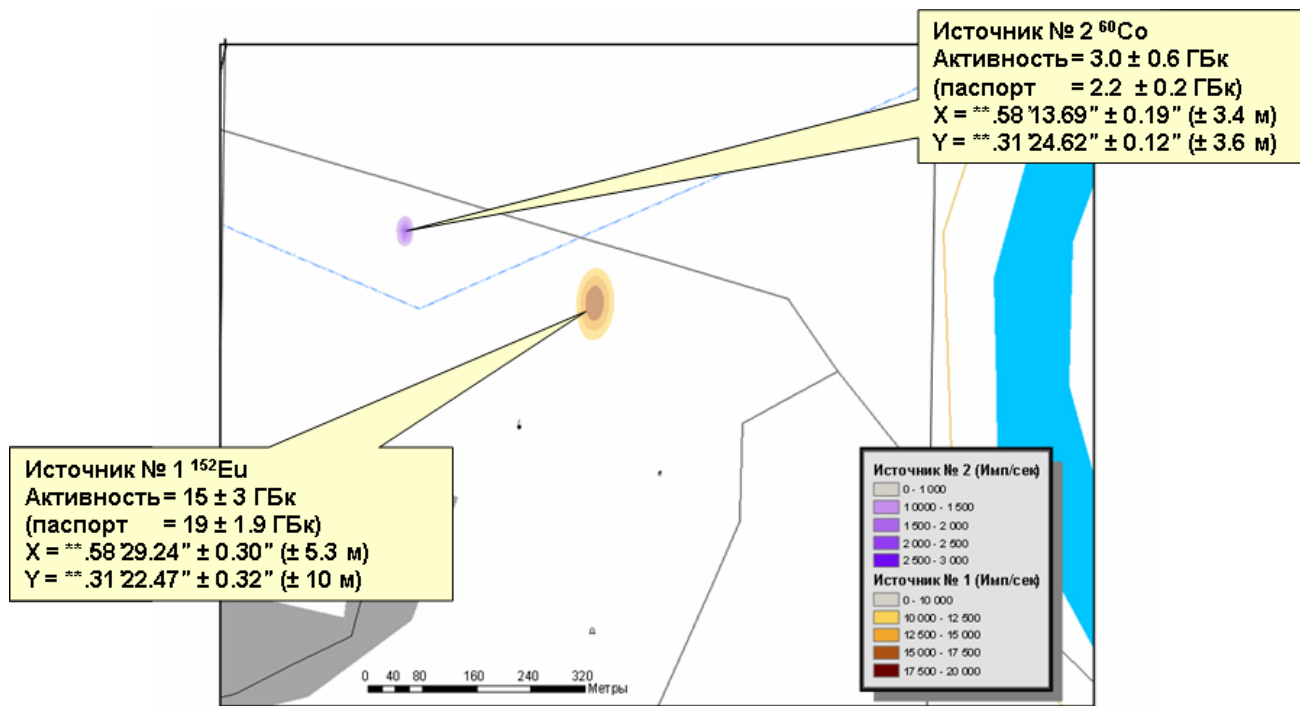


Рис.15 Локализация и определение активности обнаруженных техногенных источников (эксперимент 3).

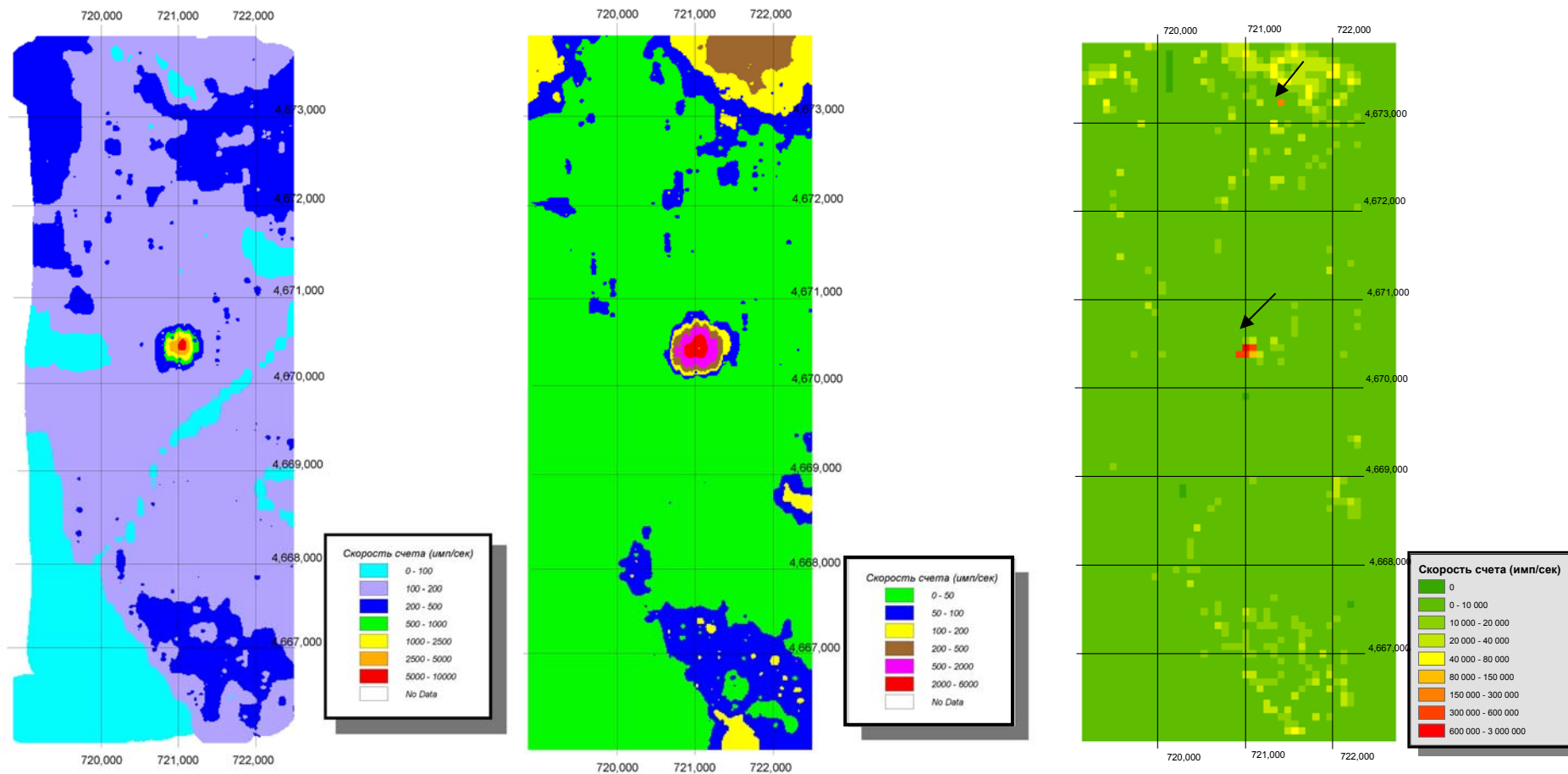


Рис.16 Пространственные распределения радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ , полученные из одних и тех же исходных данных стандартным методом энергетических окон, методом МИФИ без процедуры МВРГИ и с ее использованием.