



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИИ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ
ИНСТИТУТ РОБОТОТЕХНИКИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ

***Математическое моделирование переноса и
регистрации гамма-излучения, методы и алгоритмы
обработки спектрометрической информации для
систем авиационного радиационного мониторинга
поверхности Земли.***

Новиков Игорь Эдуардович

Россия, 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21
тел.: (812) 552-0110 (812) 552-1325 факс: (812) 556-3692 <http://www.rtc.ru> e-mail: rtc@rtc.ru



Технологии ЦНИИ РТК высокоэффективного радиационного мониторинга для экологических целей и ликвидации последствия ядерных инцидентов





Комплекс радиационной разведки и поиска ионизирующих излучений [6]

Решаемые задачи

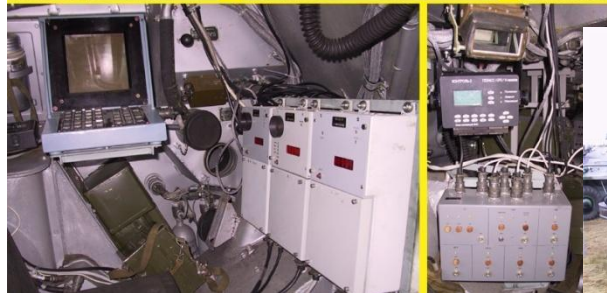
- Контроль за перемещением радиоактивных веществ и радиоактивных отходов
- Обеспечение готовности средств ликвидации чрезвычайных ситуаций к выполнению задач по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций

Назначение

- Определение границ радиоактивного заражения.
- Дистанционное измерение мощности экспозиционной дозы, обнаружение и определение местоположения точечных источников нейтронного и гамма-излучений.
- Построение карты дозных полей с нанесенными на ней локальными источниками гамма и нейтронного излучения, документирование результатов радиационной разведки.



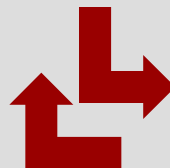
Воздушный комплекс разведки



Наземный комплекс разведки



Наземный вычислительный комплекс





Воздушный комплекс разведки [5,6]

Назначение

- Определение границ радиоактивного заражения;
- Уточнение спектрального состава;
- Измерение мощности экспозиционной дозы (МЭД);
- Поиск, обнаружение и определение местоположения точечных источников ионизирующих излучений.

Основные технические характеристики

Диапазон энергий регистрируемого гамма-излучения	0,5...2,5 МэВ
Ширина полосы разведки	0,5 км
Производительность	50 км ² /ч
Время непрерывной работы	8 часов
Диапазон измерения МЭД	10 ⁻⁵10 ³ Р/ч





Программный комплекс [1,2]: цели и задачи

Цели

- Проектирование и градуировка аппаратуры для спектрометрического дистанционного радиационного мониторинга.
- Исследование полей гамма-излучения вблизи границы раздела полубесконечных сред.

Применение

- Дистанционное определение МЭД. Поиск локальных источников. Определение нуклидного состава источника.

Специфика

- Учет многообразия всех условий измерений как в полевом, так и в лабораторном варианте.

Результаты расчетов

- Поточковые и дозовые характеристики поля излучения и аппаратурные спектры измерительных установок.

Научная проблематика

- Определение характеристик поля излучения для бесконечного и ограниченного источников в полубесконечных средах [3].
- Моделирование переноса излучения для сложных геометрических конструкций.
- Программный интерфейс.



Состав программного комплекса

Программы семейства **GRAIN** (**GR**ound-**Air** **I**nterface) предназначены для расчета характеристик поля фотонного излучения вблизи границы раздела воздух-конденсированная среда и базируются на методе Монте-Карло.

Среды: грунт, воздух, вода, бетон, кварцевый песок, железо.

Типы заглубления источника: дельта-источник, трапециидальный, экспоненциальный.

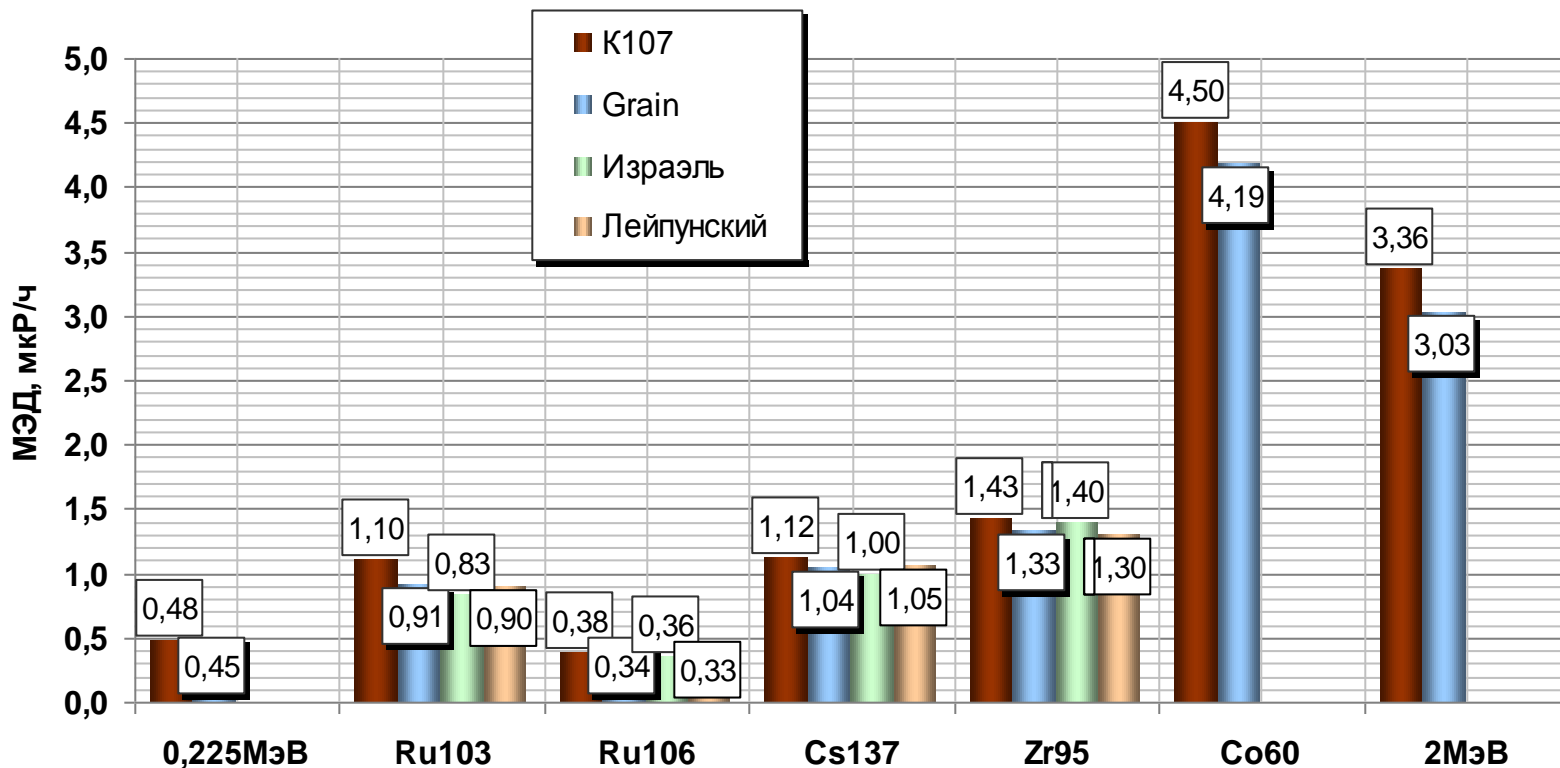
Программа **DINAM** для моделирования процесса переноса и регистрации излучения в сложных геометрических конструкциях.

Вспомогательные программы для контроля и визуализации условий и результатов расчетов.



Сравнение результатов расчетов программ GRAIN, K-107 [1] и [4] МЭД на высоте 1м для плоского источника на поверхности Земли

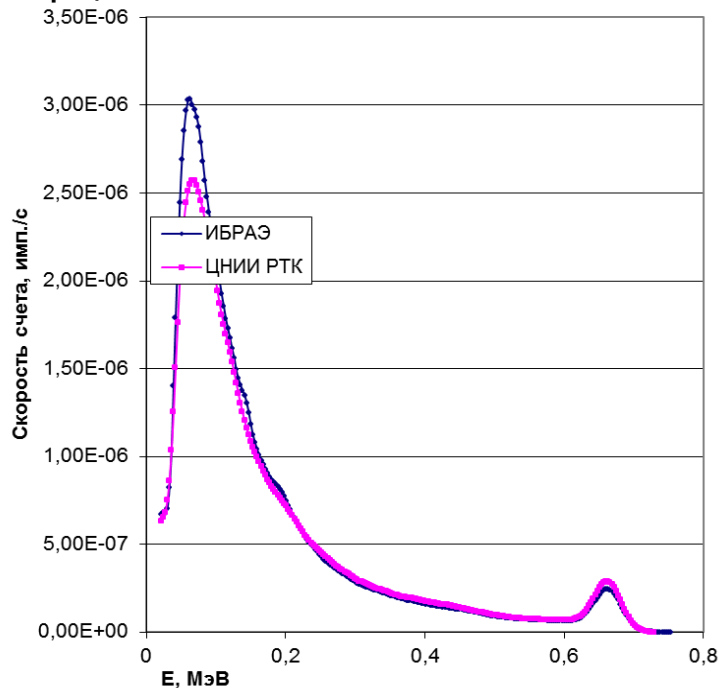
Мощность экспозиционной дозы при $A_s=100\text{мКи}$, $T_B=0^0\text{C}$



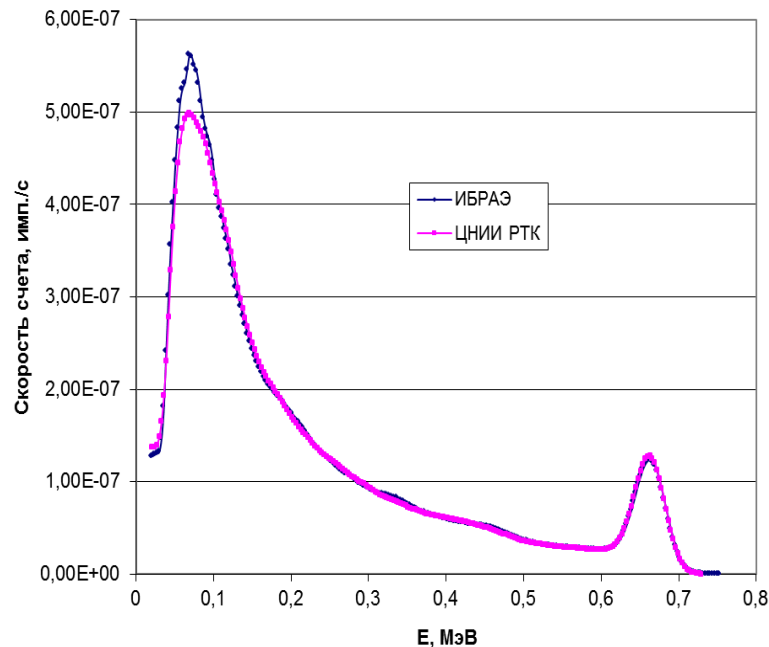


Сравнение результатов расчетов GRAIN1 + DINAM (ЦНИИ РТК) и МС НР (ИБРАЭ) Cs-137, заглубление 5 см, NaI 63×63 мм, высота 100 м.

торец+боковые



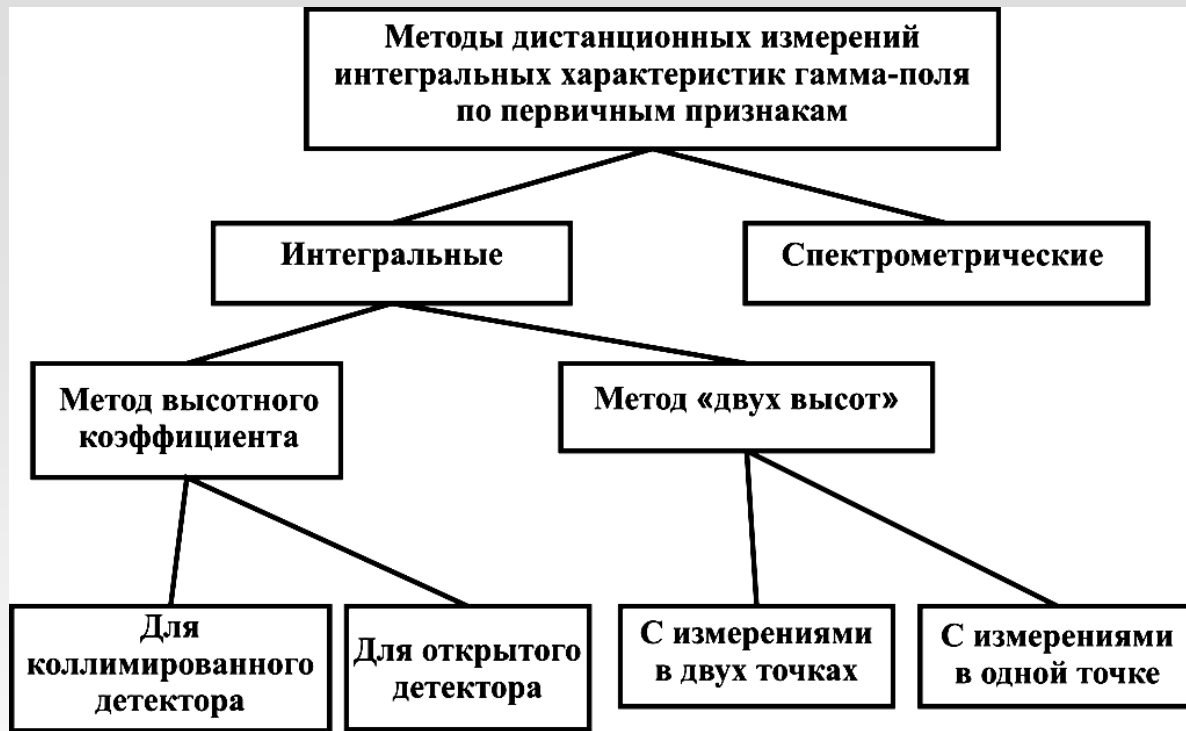
нижний торец



Аппаратурные спектры . Время измерения 1 с.

Детектор: NaI (TI) Ø63×63 мм, высота 100 м.

Источник :Cs-137, плоский слой , заглубление 5 см, активность 1 Бк/см³



Классификация дистанционных методов измерения интегральных характеристик гамма-поля по первичным признакам [1]



Метод «Спектр-Доза» для воздушных измерений

Существует универсальная не зависящая от спектра источника нагрузочная функция $\mathbf{G}(\mathbf{E})$, такая что для фиксированных условий измерений выполняется соотношение:

$$P = \int_0^{\infty} n(E)G(E)dE$$

где \mathbf{P} — мощность дозы;

$\mathbf{n}(\mathbf{E})$ — амплитуда аппаратного спектра в единицу времени;

$\mathbf{G}(\mathbf{E})$ — операторная функция для области расположения детектора.

Рассмотрим задачу оценки МЭД на высоте h над поверхностью Земли по результатам измерения аппаратного спектра на высоте H .

Для дистанционного измерения функция $\mathbf{G}^H(\mathbf{E})$ определяется из системы уравнений:

$$\sum_{j=1}^n n_{ji}^H G_j^H = P_i^h \quad (4)$$

где \mathbf{n}_{ij}^H — элемент аппаратной матрицы отклика блока детектирования, расположенного на высоте \mathbf{H} , для известным образом распределенного источника гамма-фотонов с энергией \mathbf{E}_j , \mathbf{G}_j^H — высотный коэффициент «Спектр-Доза» для \mathbf{j} -го интервала энергетической шкалы спектрометра;

\mathbf{P}_i^h — МЭД на высоте $\mathbf{h} = 1$ м от поверхности земли, создаваемая этим источником



Многоканальный Метод «Спектр-Доза»: Принципы

Запишем (4) в матричном виде:

$$\mathbf{NG} = \mathbf{P}, \quad (5)$$

где \mathbf{N} — аппаратная матрица 12×1024 ;

\mathbf{G} — вектор (функция) «Спектр-Доза»;

\mathbf{P} — вектор мощностей доз от источников с различной энергией излучения

Критерии хорошей или «корректной» градуировки \mathbf{G} :

- для априорных (исходных) спектров результаты применения \mathbf{G} должны давать точное решение;
- в исходных спектрах возможно наличие статистических флуктуаций, небольшие изменения в исходных спектрах в силу статистических флуктуаций или небольших изменений в условиях измерений аппаратных спектров должны приводить к небольшим изменениям в результатах, (должна обеспечиваться устойчивость решения);
- изменения в энергетическом составе источника излучения должно приводить и к плавному изменению формы аппаратного спектра и значению МЭД, что должно быть учтено в форме \mathbf{G} .

Второе условие означает отсутствие осцилляций в \mathbf{G} , третье – ее гладкость.



Многоканальный Метод «Спектр-Доза»: Решение [1]

Запишем (4) в матричном виде:

$$\mathbf{NG} = \mathbf{P}, \quad (5)$$

где \mathbf{N} — аппаратурная матрица 12×1024 ;

\mathbf{G} — вектор (функция) «Спектр-Доза»;

\mathbf{P} — вектор доз от источников с различной энергией излучения

Помножив левую и правую части (5) слева на транспонированную матрицу \mathbf{N}^T , получим:

$$\mathbf{N}^T \mathbf{NG} = \mathbf{N}^T \mathbf{P}, \quad (6)$$

откуда

$$\mathbf{G} = (\mathbf{N}^T \mathbf{N})^{-1} \mathbf{N}^T \mathbf{P}. \quad (7)$$

Легко проверить путем подстановки, что

$$\mathbf{G} = \mathbf{N}^T (\mathbf{N} \mathbf{N}^T)^{-1} \mathbf{P} \quad (8)$$

также является решением системы уравнений (11).

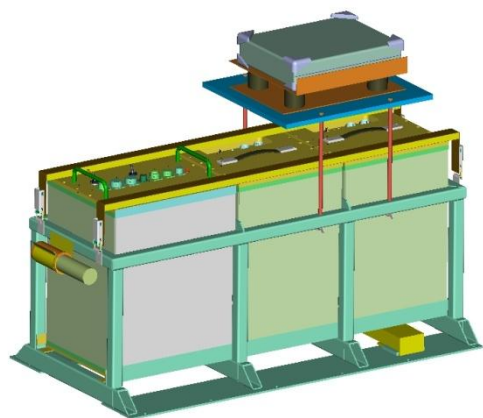
Решением системы (11) будет также

$$\mathbf{G}_s = \mathbf{N}_s^T (\mathbf{N} \mathbf{N}_s^T)^{-1} \mathbf{P}, \quad (9)$$

где \mathbf{N}_s — матрица, полученная путем сглаживания строк (спектров) матрицы \mathbf{N}



Аппаратура контроля радиационной обстановки (АКРО) для бортового вертолетного комплекса «Астрахань»



Состав:

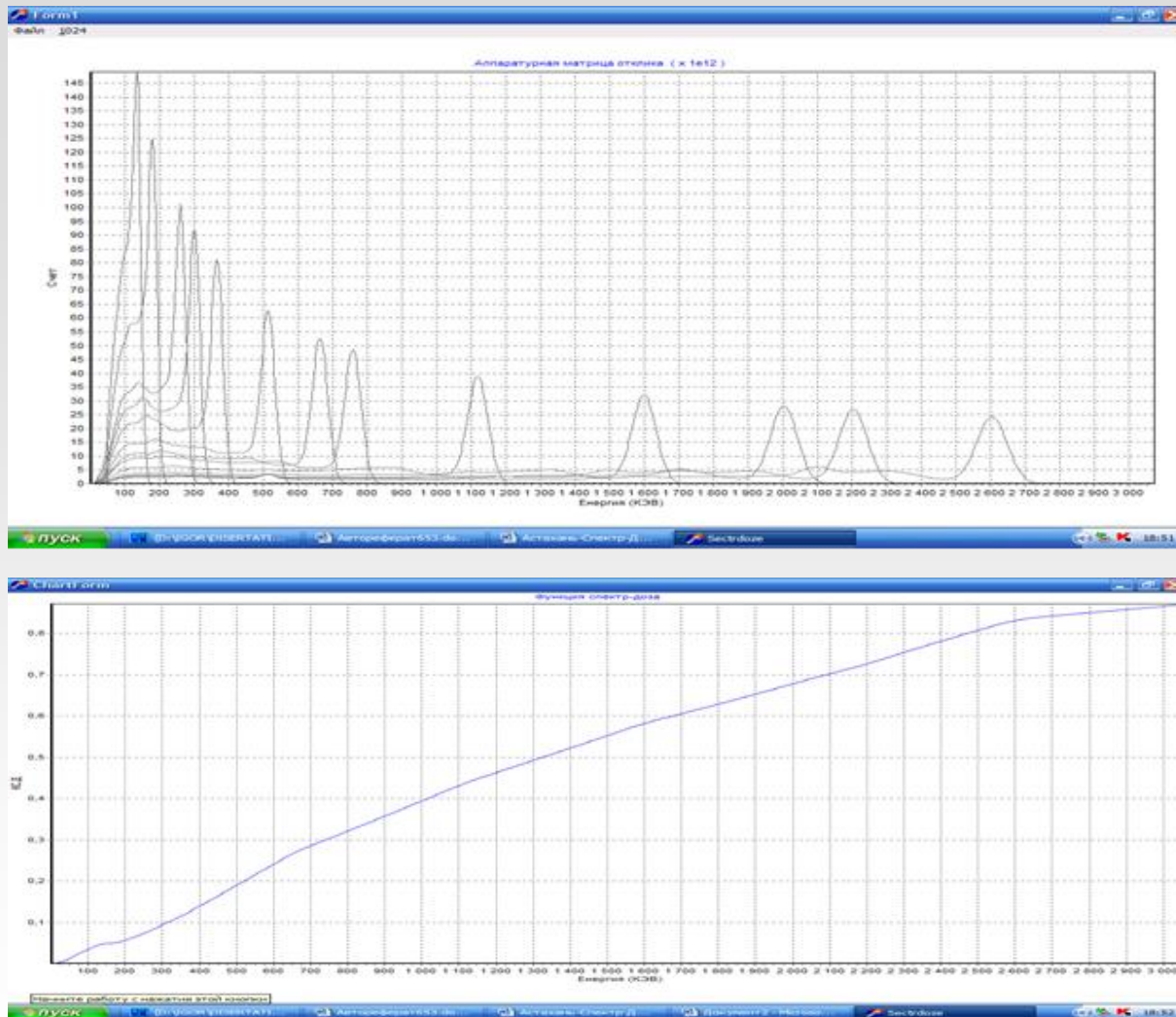
- 1 *Модуль детектирования гамма-излучения высокочувствительный (МДГ-В)*
- 2 *Блок бесперебойного питания и коммутации (ББПК)*
- 3 *Пульт управления (ПУ)*

НАЗНАЧЕНИЕ: Аэрогамма-съемка местности с борта вертолета.

РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ: Измеряются спектры гамма-излучения и определяется МПД на борту вертолета и приведенной к высоте 1 м над поверхностью Земли.



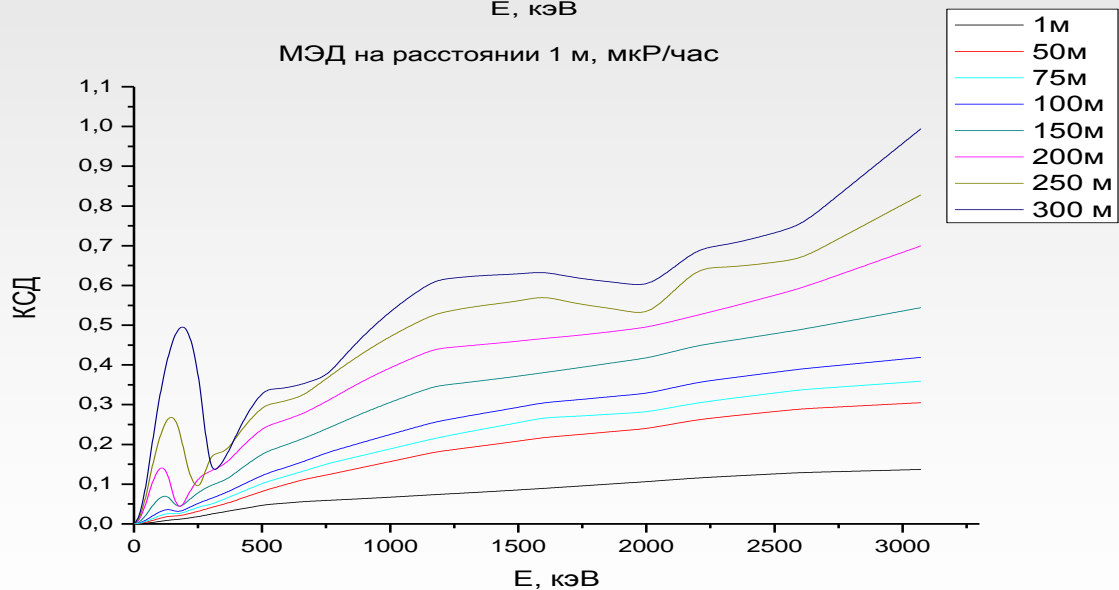
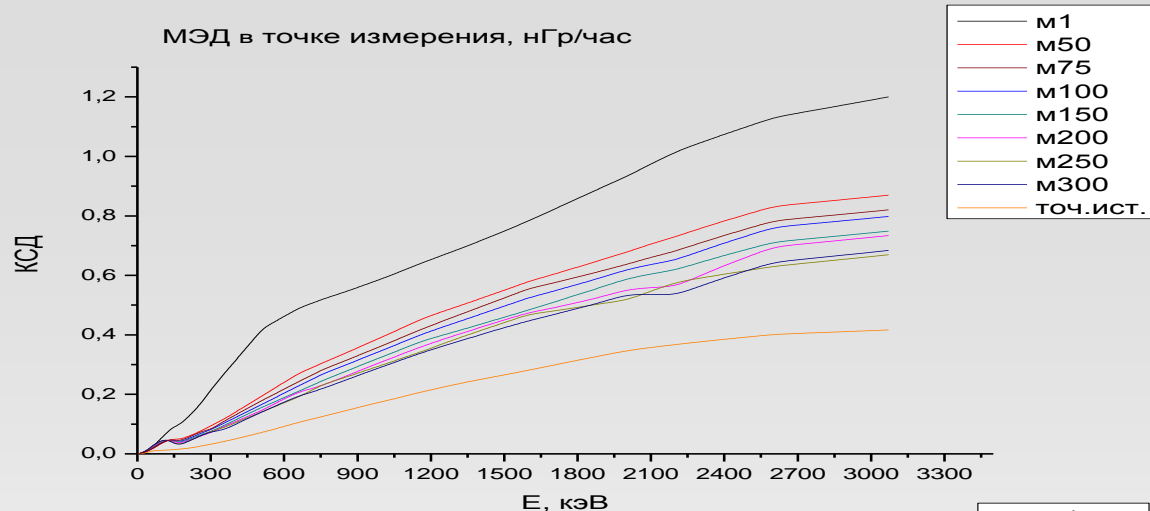
АКРО: Аппаратурные спектры и функция "Спектр-Доза"



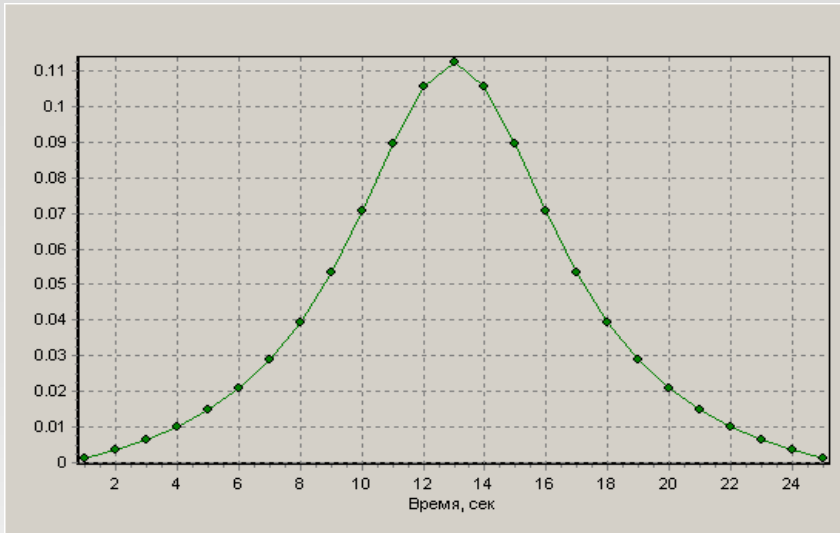
Исходные аппаратурные спектры для высоты полета 50м , детектор NaI Ø150×63 мм и дистанционная функция "Спектр-Доза" для расчета МПД на высоте 1м от бесконечного поверхностного источника.



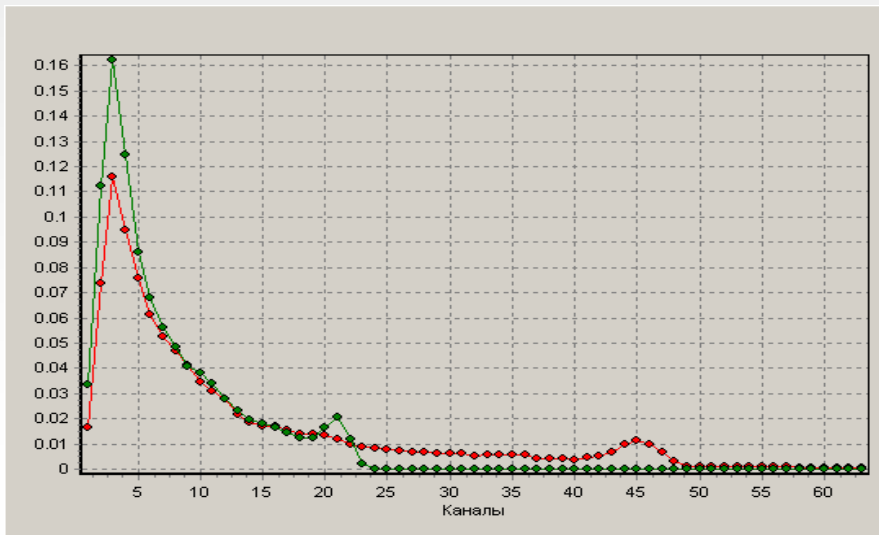
АКРО: Локальные функции "Спектр-Доза"



Локальные и дистанционные функции "Спектр-Доза" для различных высот полета и «метрологического режима» (параллельного потока).



Нормированная временная характеристика полезного сигнала μ



Нормированные спектральные характеристики полезного и фонового сигналов ν



Обнаружение источников излучения [1]

Для реализации алгоритма фильтрации полезного сигнала на фоне помехи построим следующую статистику:

$$X = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N \frac{\mu_j^c}{\mu_j^\phi} \frac{v_{ij}^c}{v_i^\phi} n_{ij}$$

где K – величина временного окна, в котором проводится скользящее суммирование,

N – количество энергетических каналов гамма-детектора,

μ_j^c – временная характеристика полезного сигнала,

μ_j^ϕ – временная характеристика фона

v_{ij}^c, v_i^ϕ – нормированные спектральные плотности полезного и фонового сигналов,

n_{ij} – счет в i -ом энергетическом канале в j -ый момент времени временного окна

Для обнаружения сигнала источника излучения на фоне помехи можно воспользоваться различиями во временных и спектральных характеристиках полезного сигнала и фона.



Обнаружение источников излучения [1]

Для оптимального обнаружения сигнала источника излучения на фоне помехи можно воспользоваться различиями во временных и спектральных характеристиках полезного сигнала и фона.

Для реализации алгоритма фильтрации полезного сигнала на фоне помехи построим следующую статистику:

$$X = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N \frac{\mu_j^c}{\mu_j^\phi} \frac{V_i^c}{V_i^\phi} n_{ij}$$

где K – величина временного окна, в котором проводится скользящее суммирование,
 N – количество энергетических каналов гамма-детектора,

μ_j^c – временная характеристика полезного сигнала,

μ_j^ϕ – временная характеристика фона

V_{ij}^c , V_i^ϕ – нормированные спектральные плотности полезного и фонового сигналов,

n_{ij} – счет в i -ом энергетическом канале в j -ый момент времени временного окна



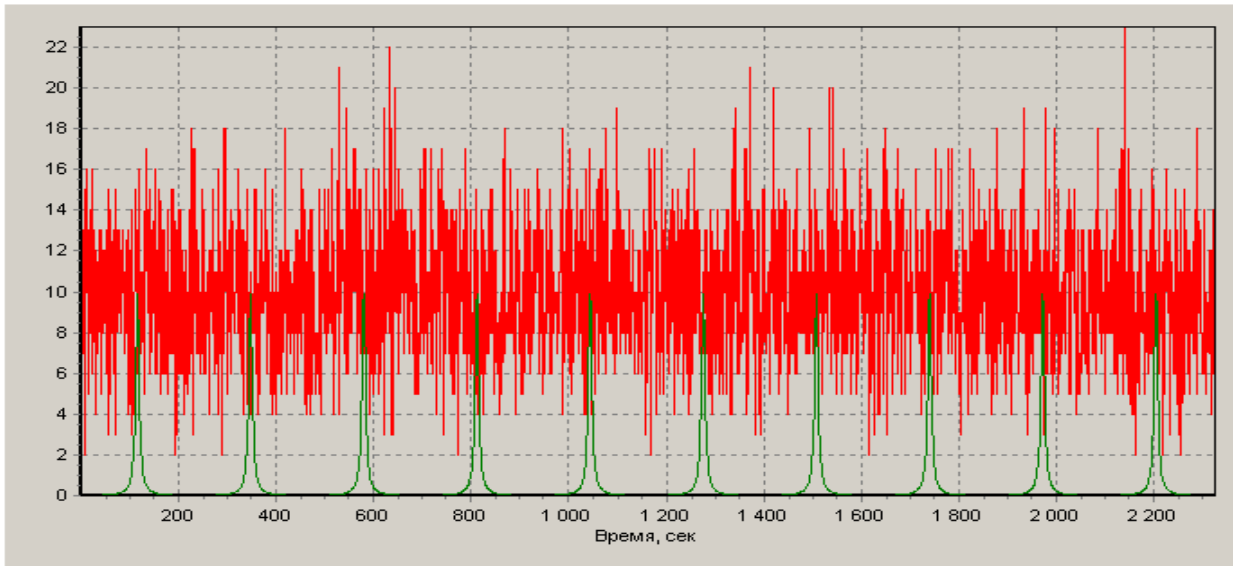
Обнаружение источников излучения

Настройка параметров модели

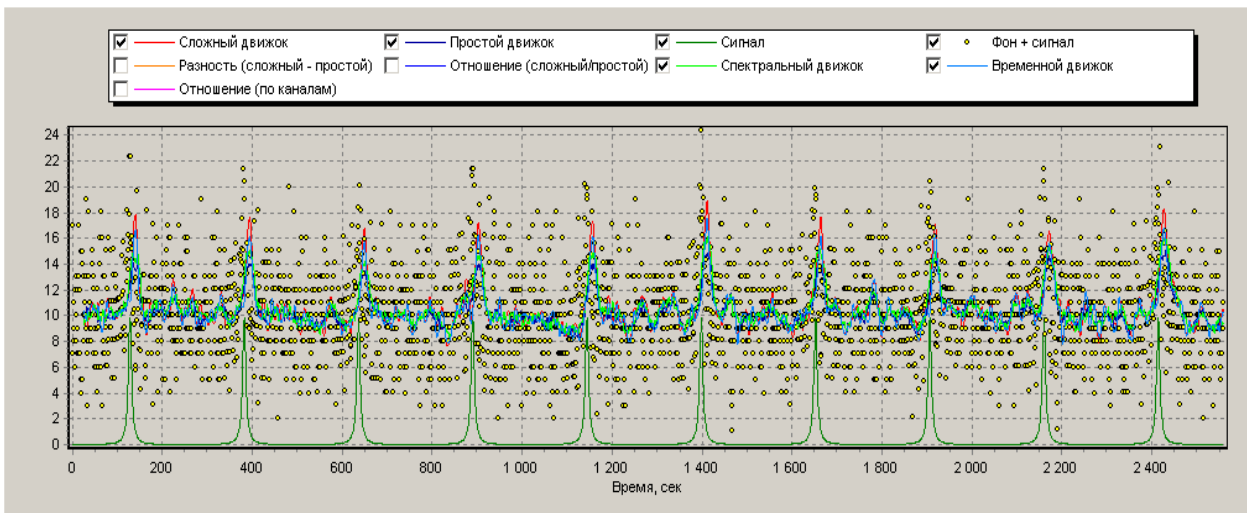
Параметры полета	Параметры детектора
Высота, м: 50	Начальный канал: 1
Боковое удаление от ИИ, м: 0	Конечный канал: 63
Скорость, км/ч: 240	Число детекторов: 1
Источники	Параметры моделирования
Число источников: 10	Время накопления, с: 1
Нуклид: Cs-137	Характер сигнала: Случайный
Спектр источника: s-137\Высота50м\0м	Номер детектора: 5
Вид источника: Точечный	Модель фона: Модельный
Интенсивность, 1/с: 100	Характер фона: Случайный
Фон	Новый случ. розыгрыш: Да
Спектр фона: Fon\fon_468_3600.dat	Вероятность обнаружения: 0.95
Интенсивность, 1/с: 450	Квантиль обнаружения: 3.4
Протокол результатов	Расчет коэффициента аппроксимации формы сигнала
Каталог с файлами: C:\Vladimir\PROJECT	

Конвертировать эксп. данные Применить Выход

Программа для моделирования процессов обнаружения.
Окно настройки параметров модели.



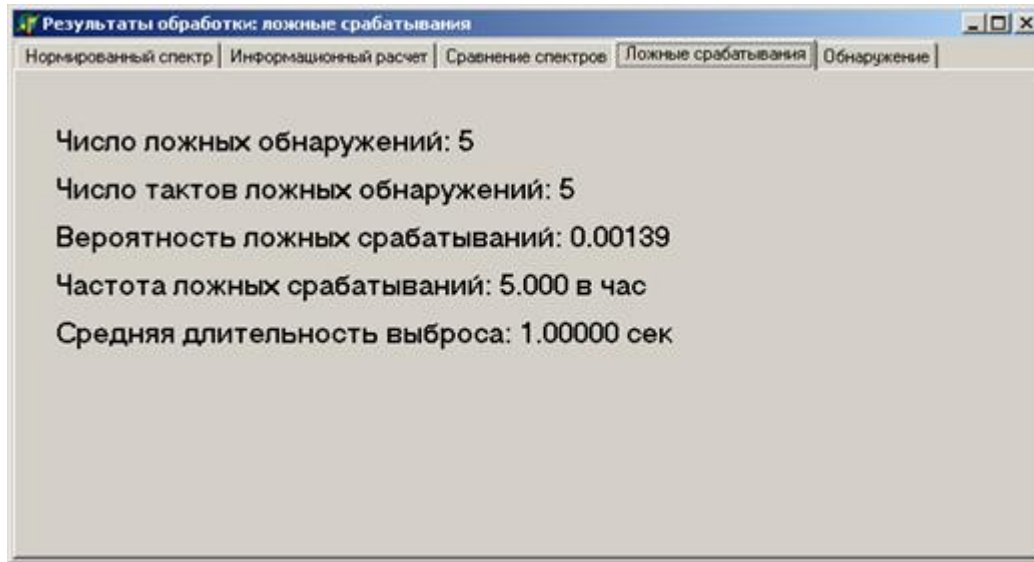
Вид сигнала и фона при отношении интенсивности сигнал/фон = 1



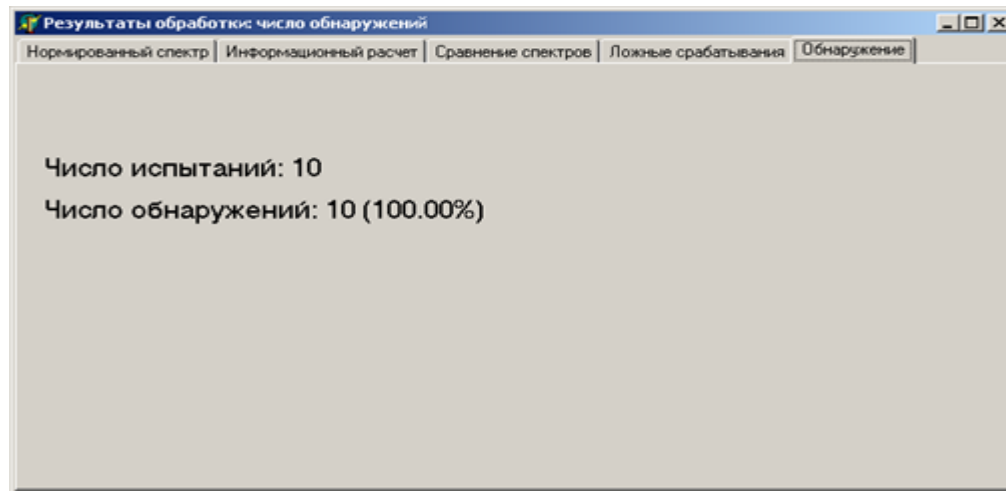
Окно результатов фильтрации. Решающее правило: сложный движок



Обнаружение источников излучения



Окно «Результаты обработки: ложные срабатывания»



Окно «Результаты обработки: число обнаружений»



ЛИТЕРАТУРА:

1. Сухоруков А.И., Хисматов И.Ф., Новиков И.Э. Основы теории аэрокосмического радиационного мониторинга Земли. Ч. 1. Физические основы радиационного дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2011. 312 с.
2. Новиков И.Э. Пакет программ математического моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения систем авиационного радиационного мониторинга // Научно-технический и производственный журнал "Вестник компьютерных и информационных технологий" № 8, 2013 С.16-21.
3. Панин М.П. Моделирование переноса излучения. М.: МИФИ, 2008. 212 с.
4. Израэль, Ю. А. Гамма-излучение радиоактивных выпадений / Ю. А. Израэль, Е. Д. Стукин — Москва : Атомиздат, 1967 .— 224 с.
5. Э.Н. Бакин Э.Н., Копаев В.И., Кудряшов А.С. Проблемные вопросы и перспективы развития системы воздушной радиационной, химической и биологической разведки местности и воздушного пространства [Электронный ресурс] //Электронное периодическое издание рецензируемый военно-научный журнал «Воздушно-космические силы. Теория и практика» № 2, июнь 2017 С. 7-17. URL: <http://vva.mil.ru/upload/site21/qFTBOpKEwc.pdf> (дата обращения 01.08.2017).
6. К. т. н. Беляев А. Н., Демченков В. П., Пярсинен А. Я Комплекс аппаратных средств воздушного и наземного поиска источников ионизирующих излучений и радиационной разведки / Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. - М.: НТЦ «Информтехника». - 2003. - Вып. 9 – 10 С.13-16.



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИИ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ
ИНСТИТУТ РОБОТОТЕХНИКИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ

Спасибо за внимание!



Россия, 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21
тел.: (812) 552-0110 (812) 552-1325 факс: (812) 556-3692 <http://www.rtc.ru> e-mail: rtc@rtc.ru