

Программно-методический комплекс «Ge Spectra Analysis System» - GeSAS для прецизионного HPGe гамма-спектрометрического радионуклидного анализа.

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

Для контактов:

Тел.: +7 (903) 581-85-33, +7 (495) 788-56-99 доб. 8463

Адрес электронной почты: egorov@radiation.ru

Web-адрес: www.radiation.ru



[Результаты применения ПМК GeSAS в тесте МАГАТЭ](#)

Введение.

Представленные в [1] результаты исследования характеристик доступных в России коммерческих программных продуктов для HPGe гамма-спектрометрического радионуклидного анализа показывают, что эти программы по целому ряду причин не могут в полной мере обеспечить требуемое качество обработки результатов измерений. К схожим выводам пришли специалисты, проводившие по заказу МАГАТЭ тестирование и сравнение ряда программных продуктов для низкофонового HPGe радионуклидного анализа от авторитетных зарубежных разработчиков [2].

В связи с необходимостью выполнения в Лаборатории «Исследования радиоактивности окружающей среды» регулярных прецизионных гамма-спектрометрических измерений точечных и объемных образцов, в том числе и малоактивных, специалисты Лаборатории решили разработать специализированный программно-методический комплекс с характеристиками, исходно обеспечивающими предельно корректное решение указанной задачи.

Разработанный программно-методический комплекс получил название «Ge Spectra Analysis System» (ПМК GeSAS). Практическое использование ПМК GeSAS подтвердило идеологическую правильность такого подхода: комплекс обеспечивает требуемое качество информации, удобен в работе и свободен от отмеченных в [1,2] недостатков. Аналогичный целевой подход был реализован при создании программно-методического обеспечения UniSampo - Advanced Gamma Spectrum Analysis Software [3], которое в составе экспертной системы радионуклидного анализа Shaman - Expert System for Radionuclide Identification [4] успешно используется в Финском национальном центре данных (Finnish National Data Centre – FiNDC), в частности, в работах по ДВЗЯИ – проблематике.

В ПМК GeSAS реализован принципиально новый подход к анализу гамма-спектрометрической информации, заключающийся в том, что в процессе обработки спектр рассматривается как единый объект, состоящий из набора гамма-линий конечного числа радионуклидов. Такой подход, в отличие от традиционных, позволяет корректно учитывать интерференцию пиков различных радионуклидов со сложными схемами распада, в том числе многочисленных пиков, не связанных напрямую с гамма-переходами: пиков сумм и пиков вылета.

ПМК GeSAS обеспечивает корректный учет каскадного суммирования гамма-квантов как при определении активностей радионуклидов в образцах, так и при калибровке спектрометра по эффективности. Это особенно важно для измерения проб в «близкой геометрии» на детекторах большого объема, т.к. позволяет, не ограничиваясь при калибровках «некаскадными» радионуклидами, использовать большее количество источников, т.е. большее количество экспериментальных данных, и обеспечить тем самым высокую точность калибровки, а также расширить энергетический диапазон калибровки.

В программе используются специальные алгоритмы, позволяющие корректно обрабатывать спектры с малой статистикой, поскольку традиционно применяемые алгоритмы обработки спектров дают в этом случае неверные результаты.

ПМК GeSAS обеспечивает возможность работы со спектрами следующих форматов:

- собственный формат SasGeSample (*.spa, *.spz);
- Ortec (*.chn, *.spe);
- Ortec GammaVision (*.spc);
- Canberra S100 (*.mca);
- Canberra Genie 2000 (*.cnf);
- AnGamma v3.3 (*.spc);
- LSRM (*.spe);
- SBS v4.0 (*.spr);
- Гринстар (*.sps);
- Прогресс-2000 (*.spc);
- Спектр (*.anl, *.clb);
- ASCII IEC (*.iec);
- IAEA (*.spe);
- Aptec v6.3 (*.sp0);
- GammaMCA-8000 (*.spk).

Существующая как в составе ПМК GeSAS, так и автономно, специальная программа-конвертер обеспечивает возможность добавления поддержки спектров других форматов.

1. Основные характеристики программно-методического комплекса GeSAS.

1.1. ПМК GeSAS реализован в виде программных модулей, позволяющих гибко перестраивать его для решения разнообразных задач радионуклидного гамма-спектрометрического анализа: определение радионуклидного состава и активности проб объектов окружающей среды, дистанционное исследование характеристик полей гамма-излучения, определение массового содержания элементов в образцах методом нейтронно-активационного анализа, определение сечений взаимодействий нейтронов или заряженных частиц с веществом, а также иных задач, требующих обработки гамма-спектрометрических данных ядерно-физических экспериментов.

1.2. В программах обработки гамма-спектров ПМК GeSAS используется принципиально новый подход к анализу спектрометрической информации, заключающийся в том, что в процессе обработки спектр рассматривается как единый объект, состоящий из набора гамма-линий конечного числа радионуклидов. Такой подход, в отличие от традиционных, позволяет корректно учитывать интерференцию спектральных пиков различных радионуклидов со сложными схемами распада, в том числе многочисленных пиков, не связанных напрямую с гамма-переходами: пики сумм при совпадениях и пики вылета одного и двух аннигиляционных квантов.

1.3. Для объективного контроля качества обработки спектра в ПМК GeSAS для каждого обработанного спектра рассчитывается параметр «коэффициент качества», значение которого при идеальной обработке спектра равняется единице. Отличие значения коэффициента качества от единицы однозначно указывает на определенные некорректности в обработке спектра. Обычно используемый для оценки правильности обработки визуальный просмотр спектра в целом ряде случаев не позволяет оценить корректность проведенной обработки. Например, правильность учета интерференции спектральных пиков различных радионуклидов со сложными схемами распада, в том числе пиков, не связанных напрямую с гамма-переходами (см. п. 1.2), таким образом установить невозможно.

1.4. В ПМК GeSAS используются специальные алгоритмы, позволяющие корректно обрабатывать спектры с малой статистикой, поскольку традиционно применяемые алгоритмы обработки спектров дают в этом случае неверные результаты.

1.5. В ПМК GeSAS, в отличие от других программ обработки, все промежуточные результаты анализа сопровождается отдельной оценкой статистических и систематических

погрешностей, что обеспечивает корректный расчет погрешности итогового результата, а также возможность планирования эксперимента (см. п. 1.12). В традиционно применяемых алгоритмах вычисления погрешности раздельная оценка не проводится, что может привести к неверным результатам.

1.6. ПМК GeSAS позволяет корректно учитывать каскадное суммирование (КС) гамма-квантов как при определении активностей радионуклидов из измеренных спектров образцов, так и при калибровке спектрометра по эффективности. Это особенно важно при измерении проб на детекторах большого объема в «близкой геометрии». Поэтому в состав программного и методического обеспечения комплекса включены:

- Метод учета эффектов КС и вычислительные алгоритмы для расчета величины эффектов КС.
- Средства учета КС в программах анализа спектров и калибровки спектрометров.
- Наборы ядерных данных для расчета КС.
- Методы и программы создания наборов ядерных данных, используемых в дальнейшем для расчета КС и развития соответствующих библиотек.
- Вспомогательные программы для расчета величины эффектов КС.

1.7. Интерфейс программы обработки спектров предоставляет ранжированный по степени возможного присутствия в конкретном спектре список радионуклидов, исходя из которого, пользователь имеет возможность самостоятельно формировать итоговый список радионуклидов для текущего обрабатываемого спектра или серии однотипных спектров. Этой возможностью следует, в частности, воспользоваться в ситуации, когда значение «коэффициента качества» отличается от единицы.

1.8. При отсутствии в спектре выраженных пиков данного радионуклида предусмотрена возможность корректно оценивать верхний предел его активности в образце с учетом вкладов других радионуклидов и условий измерения.

1.9. При анализе образцов с малой активностью комплекс позволяет корректно учитывать вклад внешнего и внутреннего фона в результаты измерений и оценивать влияние фона на погрешность. ПМК GeSAS располагает программными средствами для определения характеристик фона из экспериментальных данных.

1.10. В состав ПМК GeSAS включены средства коррекции поглощения гамма-квантов в объемных образцах различной плотности и учета различия этого поглощения в измеряемых и калибровочных образцах.

1.11. В состав ПМК GeSAS включены средства учета химического состава объемных образцов и учета различия химического состава измеряемых и калибровочных образцов.

1.12. ПМК GeSAS располагает средствами планирования измерений, позволяющие по данному измеренному спектру оценивать экспозицию, требующуюся для достижения заданной точности результатов, и, наоборот, оценивать точность, которая будет достигнута при заданной экспозиции.

1.13. Результаты работы ПМК GeSAS могут быть оформлены как в виде готовых отчетов, так и в виде файлов данных пригодных для их последующего компьютерного анализа, который может потребоваться при решении конкретных прикладных задач.

2. Состав и структура программно-методического комплекса GeSAS.

ПМК GeSAS состоит из следующих компонент.

2.1. Набор файлов данных, включающих в себя:

- Таблицы радионуклидов с их ядерно-физическими характеристиками.
- Таблицы линий гамма-излучения радионуклидов, включающие, в отличие от существующих справочных наборов данных, информацию о пиках, присутствующих в спектрах, но не соответствующих никаким линиям гамма-излучателей – пики сумм при совпадениях, пики вылета одного и двух аннигиляционных квантов.
- Таблицы с ядерными данными, описывающими распад, необходимые для учета эффектов суммирования гамма-квантов.

- Таблицы с описаниями свойств спектрометрического тракта и геометрии измерения:
 - описания калибровок спектрометра по энергии, энергетическому разрешению и эффективности;
 - параметры для коррекции влияния плотности образца на эффективность регистрации гамма-квантов;
 - параметры для коррекции влияния химического образца на эффективность регистрации гамма-квантов;
 - наборы значений чувствительности спектрометра к индивидуальным линиям гамма-излучения радионуклидов, включая указанные выше «псевдолинии». (Как правило, отдельный набор таких значений чувствительностей подготавливается экспериментальным или расчетным способом при калибровке для каждого набора «детектор + конфигурация источника + геометрия измерений»).
- Средства для хранения описаний исследуемых образцов, описания условий измерений, измеренных спектров и результатов их обработки.
 - Программы, обеспечивающие управление набором данных, внесение и редактирование данных, интерфейс с программами подготовки данных и программами анализа спектров.

2.2. Вспомогательные методики и программы для подготовки данных, в том числе:

- Метод и программа для расчета эффектов каскадного суммирования, позволяющие на основе схем распада радионуклидов и калибровок спектрометра по эффективности (эффективности в пике полного поглощения и полной эффективности) определять значения чувствительностей для всех гамма-линий обрабатываемого спектра, как «истинных», связанных с соответствующими гамма-переходами при распаде радионуклидов, так и «фиктивных», образующихся в детекторе в результате суммирования каскадных или вылета аннигиляционных гамма-квантов. В таблице 1 приведен пример коррекции чувствительностей спектрометра для радионуклида ^{134}Cs с учетом эффекта истинных совпадений гамма-квантов в детекторе. Для сравнения представлены результаты непосредственного измерения чувствительностей.
- Метод и программа калибровки спектрометра по абсолютной эффективности в пике полного поглощения, позволяющие на основе экспериментальных данных:
 - автоматически выбирать вид функции, описывающей зависимость абсолютной эффективности регистрации в пике полного поглощения от энергии гамма-квантов, и вычислять по имеющимся экспериментальным данным ее параметры, оценки погрешностей параметров и корреляцию между ними;
 - использовать для калибровки по абсолютной эффективности в пике полного поглощения совместно с источниками с известной абсолютной активностью также и **источники с неизвестной абсолютной активностью**, что позволяет увеличить количество доступных экспериментальных данных и тем самым повысить точность калибровки и расширить ее энергетический диапазон;
 - учитывать искажение спектров калибровочных источников эффектами каскадного суммирования (см. выше), что позволяет использовать для калибровки источники со сложными схемами распада, что, в свою очередь позволяет не ограничиваться при калибровках «некаскадными» радионуклидами, т.е. использовать большое количество источников и тем самым повышать точность калибровки и расширять ее энергетический диапазон;
 - учитывать отличия в плотности и химическом составе калибровочных источников от реальных измерительных образцов, что позволяет увеличить количество доступных экспериментальных данных и тем самым повысить точность калибровки и расширить ее энергетический диапазон..

В качестве примеров на рисунках 1-3 представлены результаты проведенных с использованием ПМК GeSAS калибровок по эффективности HPGe детекторов с относительной эффективностью 33% и 130%.

Из рисунков видно, что эффекты каскадного суммирования гамма-квантов могут вносить существенные искажения в получаемые результаты. В отдельных случаях искажения могут оставлять более чем порядок величины (рисунок 1.1). Разработанная методика коррекции каскадного суммирования устраняет эти недостатки и позволяет не ограничиваться при калибровках «некаскадными» радионуклидами, т.е. использовать большое количество источников и тем самым повышать точность калибровки HPGe детекторов по эффективности и расширять ее энергетический диапазон. На всех рисунках приведен коридор ошибок расчетной кривой эффективности на уровне доверительной вероятности 95%

- Метод и программа калибровки спектрометра по полной эффективности, позволяющие по ограниченному числу моноэнергетических калибровочных источников получать значения полной эффективности спектрометра в точечной и объемной геометриях измерений.

- Метод и программа для коррекции результатов на поглощение гамма-квантов в объемном образце, позволяющие по экспериментальным данным определять параметры зависимости эффективности регистрации гамма-квантов от плотности объемных образцов и использовать эти параметры для коррекции вычисляемых активностей.

- Метод и программа для коррекции вычисляемых активностей с учетом химического состав объемного образца.

2.3. Программные модули для количественного анализа спектров (как спектров исследуемых образцов, так калибровочных и фоновых спектров), ориентированные, в том числе, и на анализ спектров с малой статистикой отличаются следующими особенностями:

- Определение активностей радионуклидов в образце производится одновременно по всем спектральным линиям гамма-излучения всех радионуклидов, в том числе и «фиктивным», что увеличивает возможности обнаружения радионуклидов и уменьшает погрешность определения их активностей.

- Используются алгоритмы, позволяющие корректно обрабатывать спектры с малой статистикой, поскольку традиционно применяемые алгоритмы обработки спектров дают в этом случае ошибочные результаты.

- Оценка верхнего предела для активностей радионуклидов, пики которых в спектре не обнаружены, производится с учетом фоновых характеристик спектрометра и условий измерения спектра. Список радионуклидов, которые определяются в образце, корректируется программой на основе результатов анализа спектра.

- Определение всех промежуточных и окончательных результатов анализа сопровождается отдельной оценкой статистических и систематических погрешностей.

- Программы допускают широкий диапазон степени интерактивности – от полностью автоматической обработки до полного управления оператором хода обработки.

3. Программа обработки спектров и определения радионуклидного состава образца.

Эта программа имеет широкий диапазон степени интерактивности – от полностью автоматической обработки рутинных измерений до полного управления оператором хода обработки. При обработке в интерактивном режиме программа предоставляет оператору возможность полного поэтапного контроля всего процесса обработки с выводом промежуточных вычислений в процессе обработки. Методически программа состоит из двух взаимосвязанных частей:

- Определение параметров спектральных пиков.
- Определение активностей радионуклидов в образце.

3.1. В интерактивном режиме процедура обработки спектра состоит из нескольких этапов:

3.1.1. На первом этапе целью обработки спектра является определение скоростей счета и других параметров пиков полного поглощения, суммарных пиков и пиков вылета, а также оценка их погрешностей. Исходными данными для обработки служат измеренный спектр и информация об образце и условиях его измерения, характеристики спектрометра и библиотека данных о радионуклидах и их гамма-излучении. Оператор, проводящий обработку, руководствуется представленными на экране изображением спектра, таблицей линий гамма-излучения с их характеристиками и подсказками программы и может управлять форматом изображения, выбирать пики или группы пиков для анализа, задавать или корректировать выбранные программой границы пиков и групп пиков, идентифицировать пики или корректировать идентификацию пиков программой. Используемые в программе алгоритмы позволяют определять положения, площади и ПШПВ одиночных пиков, проводить разрешение мультиплетов с определением положений и площадей составляющих, оценивать верхний предел площади для внесенных в список, но не обнаруженных в спектре пиков. В ходе обработки выполняется автоматическая настройка энергетической шкалы спектрометра на данный спектр. Для всех определяемых величин раздельно проводится оценка их статистических и систематических погрешностей.

3.1.2. На следующем этапе по определенным при обработке спектра скоростям счета в пиках вычисляются содержания радионуклидов в образце из заданного списка радионуклидов. После учета фоновых скоростей счета и внесения коррекции на плотность спектрометрического образца с помощью хранящихся в библиотеке данных значений чувствительности спектрометра (отношение скорости счета в пике к активности источника) по всем линиям (в том числе и «фиктивным») вычисляются активности радионуклидов или оцениваются их верхние пределы.

3.1.3. На основании полученных результатов формируется протокол измерений, в котором перечислены характеристики пробы и приготовленного из нее спектрометрического образца, описаны условия измерений и приведены значения удельных активностей радионуклидов в пробе в единицах Бк/кг на дату отбора пробы. Если проба характеризуется определенной поверхностью, то приводятся также значения удельных активностей в единицах Бк/м², а если объемом, то в единицах мБк/см³. Погрешности получаемых значений активностей радионуклидов определяются систематическими погрешностями используемых данных (характеристики применяемых при калибровке по эффективности и чувствительности образцовых источников, параметры для коррекции на самопоглощение в образце и др.) и статистикой спектра, и составляют обычно от 5% до 15%. При измерении образцов, содержащих короткоживущие нуклиды, все полученные активности приводятся на момент отбора проб, а также корректируются на распад за время измерения.

3.2. При работе программы в автоматическом режиме обработки спектра оператор указывает название спектра или спектров, подлежащих обработке, соответствующие набор «детектор + конфигурация источника + геометрия измерений параметры образца», энергетическую калибровку, библиотеку нуклидов, форму представления результатов и предлагает выполнить обработку.

На рисунке 4 представлен пример протокола, сформированного по результатам обработки спектра ПМК GeSAS, а на рисунке 5 - пример достаточно сложного HPGe спектра, обработанного ПМК GeSAS в автоматическом режиме.

Работоспособности реализованных в ПМК GeSAS методов проверялась, в частности, в рамках программы «Метрологическая экспертиза гамма-спектрометров на предприятиях 16-го ГНТУ Министерства атомной энергии РФ». Было проведено количественное определение содержания ¹³⁷Cs, ²³²Th и ¹⁵²Eu в образцах, предоставленных НИКИЭТ [5]. Отношения полученных нами оценок удельных активностей к их паспортным значениям составили:

$$^{137}\text{Cs} - 1.01 \pm 0.05; \quad ^{232}\text{Th} - 0.95 \pm 0.09 \quad ^{152}\text{Eu} - 1.02 \pm 0.10$$

Таблица 1. Коррекция чувствительностей для радионуклида ^{134}Cs с учетом эффекта истинных совпадений гамма-квантов в детекторе (Погрешности на уровне 95%).

Энергия, кэВ	Квантовый выход, %		Чувствительность, 1/ксек/Бк *1000		
	Табличное значение	Из схемы распада	Из кривой эффективности	С коррекцией на совпадения	Из эксперимента
475.36	1.49 ± 0.02	1.48	1.35 ± 0.05	0.83 ± 0.04	0.86 ± 0.10
563.25	8.39 ± 0.08	8.38	6.89 ± 0.22	4.00 ± 0.16	3.99 ± 0.24
569.33	15.38 ± 0.12	15.32	12.53 ± 0.40	7.26 ± 0.29	7.44 ± 0.38
604.72	97.62 ± 0.06	97.61	77.2 ± 2.5	55.0 ± 2.1	54.6 ± 2.8
795.86	85.53 ± 0.08	85.46	58.2 ± 2.0	42.8 ± 1.7	41.2 ± 2.1
801.95	8.69 ± 0.08	8.72	5.91 ± 0.20	3.65 ± 0.15	3.64 ± 0.20
1038.61	0.99 ± 0.01	1.00	0.577 ± 0.024	0.51 ± 0.03	0.50 ± 0.06
1167.97	1.79 ± 0.02	1.81	0.960 ± 0.040	1.14 ± 0.05	1.14 ± 0.09
1174.05	0	0	0	0.744 ± 0.036	0.770 ± 0.055
1365.18	3.012 ± 0.024	3.014	1.39 ± 0.07	2.03 ± 0.11	2.06 ± 0.13
1400.59	0	0	0	4.38 ± 0.21	4.26 ± 0.25
1406.67	0	0	0	0.29 ± 0.02	0.28 ± 0.03
1643.33	0	0	0	0.065 ± 0.004	0.046 ± 0.013
1969.92	0	0	0	0.26 ± 0.02	0.27 ± 0.03

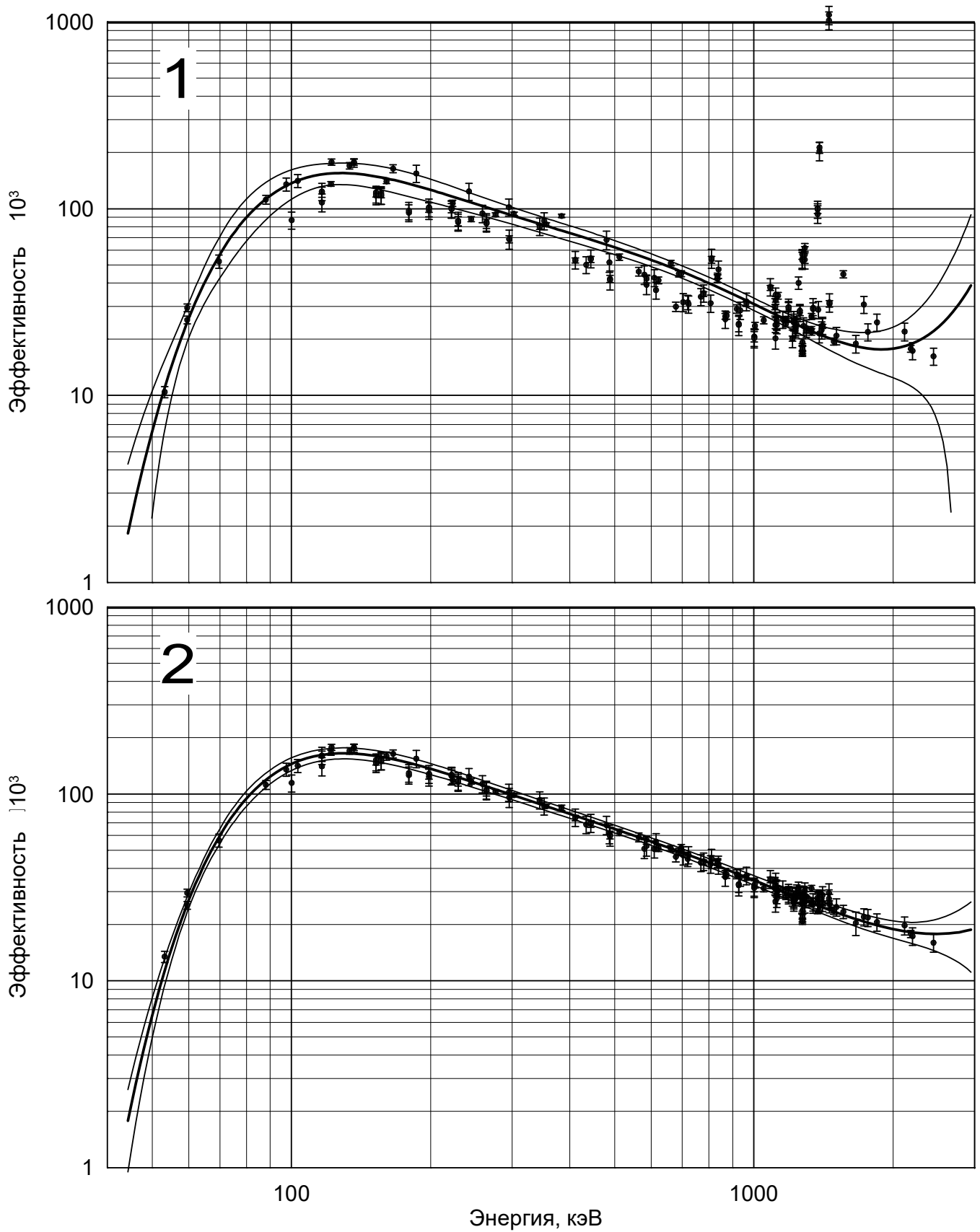


Рисунок 1. Эффективность регистрации детектора ORTEC GEM-30185 для точечного источника на поверхности детектора на его оси:
 1 - без коррекции на каскадные совпадения гамма-квантов;
 2 - с коррекцией на каскадные совпадения гамма-квантов.

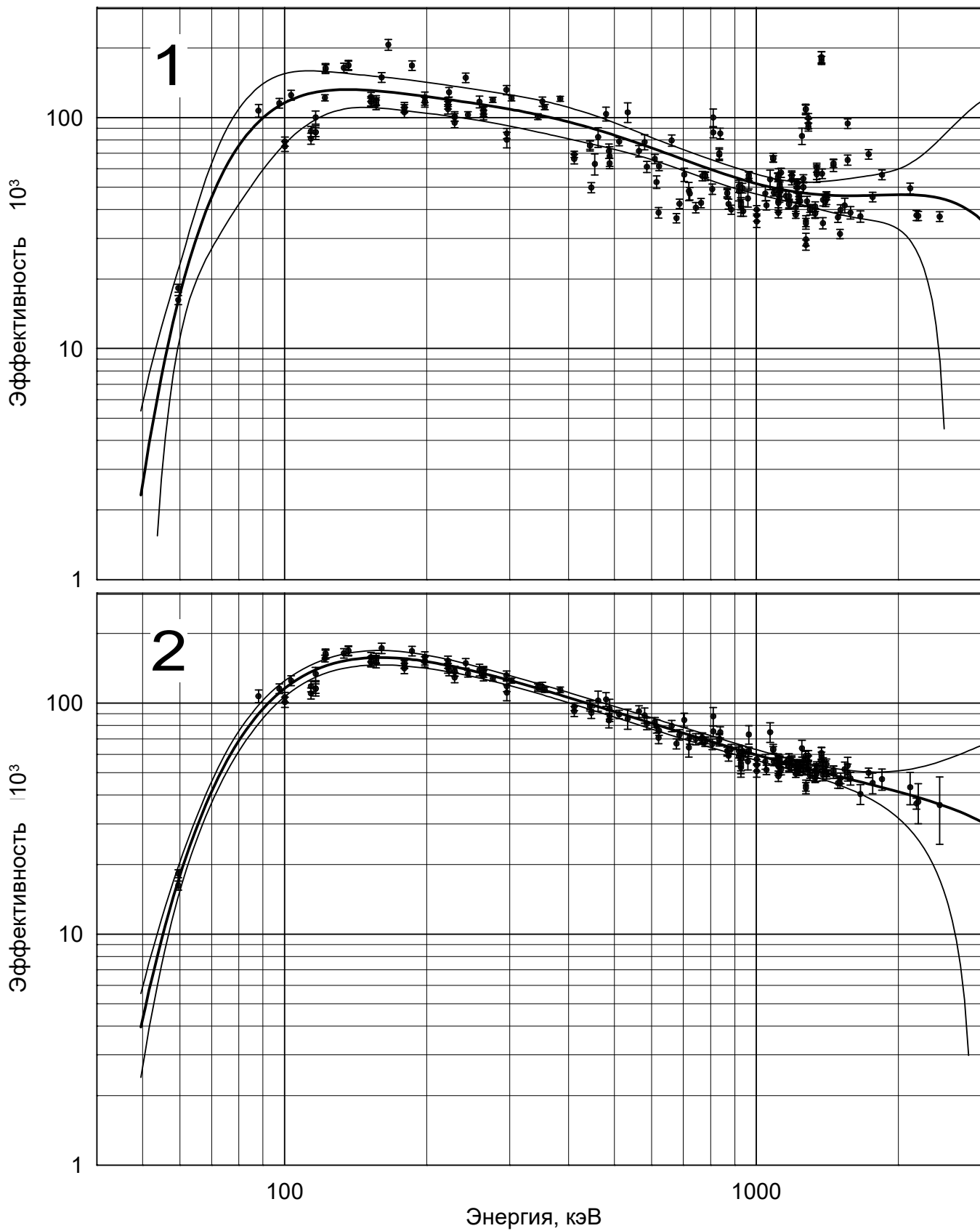


Рисунок 2. Эффективность регистрации детектора CANBERRA GC 130210 для точечного источника на поверхности детектора на его оси:
 1 - без коррекции на каскадные совпадения гамма-квантов;
 2 - с коррекцией на каскадные совпадения гамма-квантов.

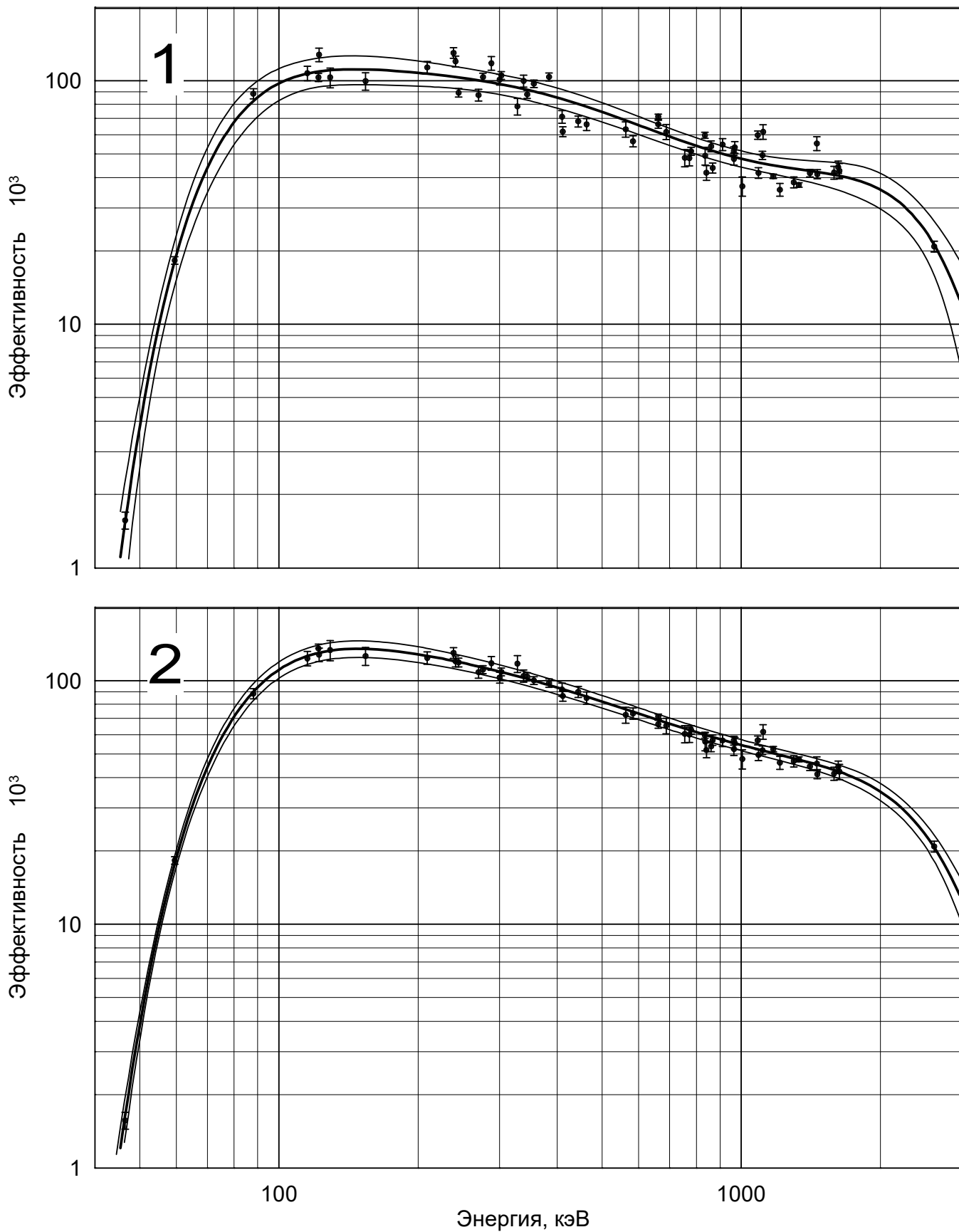


Рисунок 3. Эффективность регистрации детектора CANBERRA GC 130210 для объемного источника $\varnothing 70 \times 6$ мм на поверхности детектора на его оси:
 1 - без коррекции на каскадные совпадения гамма-квантов;
 2 - с коррекцией на каскадные совпадения гамма-квантов.

**ЛАБОРАТОРИЯ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ (ЛРК-1 МИФИ)
РЕЗУЛЬТАТЫ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
РАДИОНУКЛИДНОГО СОСТАВА ОБРАЗЦА**

ОБРАЗЕЦ	#1555
ОБЪЕМ	0.0 куб.см
МАССА	1.0 г
ДАТА ОТБОРА	21.04.2005
СПЕКТР	#1555
ДЕТЕКТОР	D07A
ЗАЩИТА	S07A
СТАРТ	07.06.2005 11:47:20
СТОП	08.06.2005 10:30:42
ЭКСПОЗИЦИЯ	22.71 час.
ОБЛАСТЬ АНАЛИЗА	100 - 2700 кэВ
ДАТА ОБРАБОТКИ	20.06.2005 13:39:20

СОДЕРЖАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ОБРАЗЦЕ (Бк)

	Стат.	Сист.
Ra-226e	<0.031	
Th-232e	< 0.050	
K-40	< 0.19	
Be-7	< 0.22	
U-235	< 0.026	
U-235e	< 0.022	
U-238e	0.73 ± 0.71 (97%)	± 0.70 (96%) ± 0.07 (9%)
Eu-152	<0.040	
Eu-154	0.304 ± 0.086(28%)	± 0.074(24%) ± 0.044(15%)
Eu-155	0.116 ± 0.074(64%)	± 0.063(54%) ± 0.040(34%)
Ba-133	<0.020	
Sb-125	0.054 ± 0.036(67%)	± 0.036(67%) ± 0.004(7%)
Cs-137	20.3 ± 1.6 (8.1%)	± 0.2 (0.8%) ± 1.6 (8.0%)
Cs-134	0.562 ± 0.063(11%)	± 0.033(6%) ± 0.054(10%)
Co-60	<0.014	
Ru-106e	< 0.12	
Sc-46	< 0.006	

Активности приведены на время начала измерения
Все погрешности приведены на доверительном уровне 95%

Рисунок 4. Результат обработки спектра комплексом программ GeSAS. Протокол измерения спектрометрического (измерительного) образца #1555.

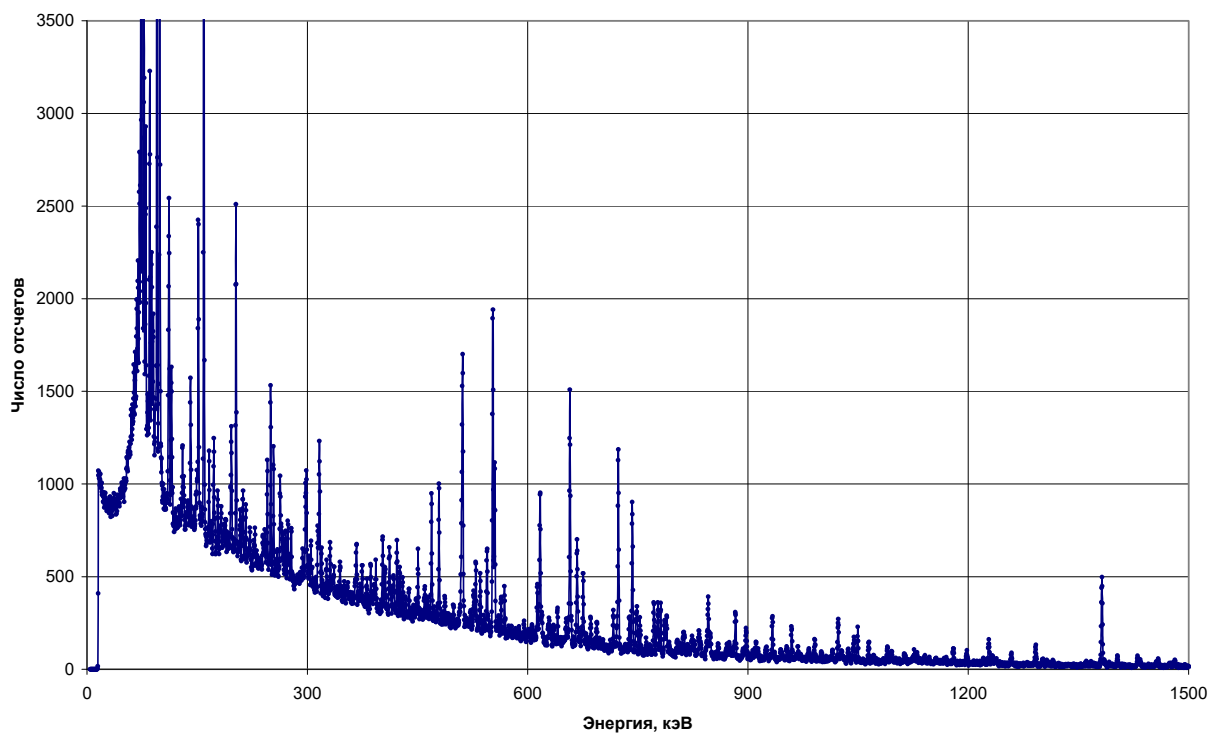


Рисунок 5. Спектр гамма-излучения продуктов, образовавшихся при облучении образца урана пучком протонов.

Список литературы.

1. Научно-технические отчеты по НИР «Спектр». МИФИ, Москва.
2. Dirk Arnold, Menno Blaauw, Stjepko Fazinic, Vladimir P. Kolotov
The 2002 IAEA intercomparison of software for low-level γ -ray spectrometry.
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Volume 536, Issues 1-2, 1 January 2005, Pages 196-210.
3. UniSampo—Advanced Gamma Spectrum Analysis Software, Version 1.62. User's Guide. Doletum Oy, Espoo. November 28, 2000.
4. Shaman—Expert System for Radionuclide Identification, Version 1.07. User's Guide. Baryon Oy, Espoo. October 27, 2000.
5. Результаты метрологической экспертизы гамма-спектрометров на предприятиях 16 ГНТУ методом «темной» пробы. Отчет НИКИЭТ. 1-00.05-10-02. 94-1963Р 240-275. Москва. 1995 г.