

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ
РАДИОНУКЛИДОВ В СЧЕТНЫХ ОБРАЗЦАХ
НА СПЕКТРОМЕТРАХ, РАБОТАЮЩИХ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ
ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА**

СПЕКТРРАД
(SPECTRRAD)

2025 г.

Автор методики:
Дрёмин Геннадий Иванович

Содержание:

1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ	5
2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ	5
3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ	8
3.1 СПЕКТРОМЕТР.....	8
3.2 КОНТРОЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК.....	9
3.3 ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.....	10
4. УСТАНОВКА ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА «СПЕКТРАД» НА СПЕКТРОМЕТР	10
5. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ	10
6. ТРЕБОВАНИЕ К ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ И КВАЛИФИКАЦИИ ОПЕРАТОРА.....	10
7. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ.....	11
8. ПОДГОТОВКА К ИЗМЕРЕНИЯМ	12
9. ТРЕБОВАНИЯ К СЧЕТНЫМ ОБРАЗЦАМ.....	12
10. ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ	13
10.1 РЕЖИМ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	14
11. ГРУППОВАЯ ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ ИЗ АРХИВА ИЗМЕРЕНИЙ	16
12. ФОРМА ОТЧЕТА О РЕЗУЛЬТАТАХ ОБРАБОТКИ.....	18
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	21
РАСЧЁТ АКТИВНОСТЕЙ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ	21
<i>Метрика</i>	21
<i>Объект</i>	21
<i>Модель</i>	22
<i>Решение</i>	23
<i>Оценка погрешностей</i>	24
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА.....	26
КАЛИБРОВКА ШИРИНЫ ПИКОВ	27
КАЛИБРОВКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ.....	28
РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ СПЕКТРОВ ИЗ СПЕКТРОВ ЭТАЛОНОВ	28
РАСЧЁТ МОДЕЛЕЙ ПИКОВ И ЛИНИЙ.....	29
РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ СПЕКТРОВ ПО ТАБЛИЦЕ ЛИНИЙ.....	31
ИНТЕРПОЛЯЦИЯ СПЕКТРОВ КОМПОНЕНТ	32
ПОИСК ПИКОВ	32
АППРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРА НЕПРЕРЫВНОГО РАССЕЯНИЯ.....	33
УЧЁТ КАСКАДНЫХ ПЕРЕХОДОВ	34
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	35
НЕКОТОРЫЕ СТАНДАРТНЫЕ ШАБЛОНЫ ОБРАБОТКИ АЛЬФА СПЕКТРОВ.....	35
НЕКОТОРЫЕ СТАНДАРТНЫЕ ШАБЛОНЫ ОБРАБОТКИ БЕТА СПЕКТРОВ.....	46
НЕКОТОРЫЕ СТАНДАРТНЫЕ ШАБЛОНЫ ОБРАБОТКИ ГАММА СПЕКТРОВ В «СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ»	54
НЕКОТОРЫЕ СТАНДАРТНЫЕ ШАБЛОНЫ ОБРАБОТКИ ГАММА СПЕКТРОВ В «ППД СПЕКТРОМЕТРИИ»	68
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	84
ШАБЛОН ОТЧЁТА «ОБЩИЙ»	84
ШАБЛОН ОТЧЁТА «ПРОДУКТЫ»	85

МЕТОДИКА ПОВЕРКИ СПЕКТРОМЕТРОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА СПЕКТРРАД.....	86
1. ПЕРЕЧЕНЬ АТТЕСТУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ	86
2. ОПЕРАЦИИ ПОВЕРКИ.....	86
3. СРЕДСТВА ПОВЕРКИ.....	88
4. ТРЕБОВАНИЕ К КВАЛИФИКАЦИИ ПОВЕРИТЕЛЕЙ.....	89
5. ТРЕБОВАНИЕ К ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ	89
6. УСЛОВИЯ ПОВЕРКИ.....	89
7. ПОДГОТОВКА К ПОВЕРКЕ.....	89
8. ПРОВЕДЕНИЕ ПОВЕРКИ СПЕКТРОМЕТРА.....	89
8.1. Внешний осмотр.....	89
8.2. Опробование.....	90
9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	90
9.1. Измерения контрольного источника.....	97
9.2. Статистическая обработка результатов измерения контрольного источника.....	99
9.2.1 Оценка погрешностей измерений	100
9.2.2 Оценка дрейфа коэффициента преобразования	105
9.2.3 Оценка энергетического разрешения	106
9.3. Измерения фона	107
9.3.1. Расчёт коэффициента изменчивости фона и нижнего предела диапазона измерений для «сцинтилляционных» спектрометров	110
9.3.2 Расчёт нижнего предела диапазона измерений для «ППД» спектрометров	116
10. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРКИ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	120
Протокол 1.....	120
Протокол 2-ГАММА	121
Протокол 3.....	122
Протокол 4.....	123
Протокол 5.....	124
Протокол 6.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	126
ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕННЫХ ПРОТОКОЛОВ ПОВЕРКИ.....	126
Протокол 2-гамма.....	126
Протокол 3-гамма.....	127
Протокол 4-гамма.....	128
Протокол 5-гамма.....	129
Протокол 6-гамма.....	130

1. Назначение и область применения методики

В настоящем документе изложена методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на альфа, бета и гамма спектрометрах, работающих под управлением программного пакета «СПЕКТРРАД», версия 16 и выше.

Диапазон измеряемых активностей определяется техническими характеристиками спектрометра. Минимально измеряемая активность и нижний предел диапазона измерений определяется при метрологической аттестации (поверке) спектрометра.

2. Метод измерений

Метод основан на регистрации спектрометром излучения, испускаемого веществом счетного образца в регламентированной геометрии, с последующей обработкой накопленных спектров.

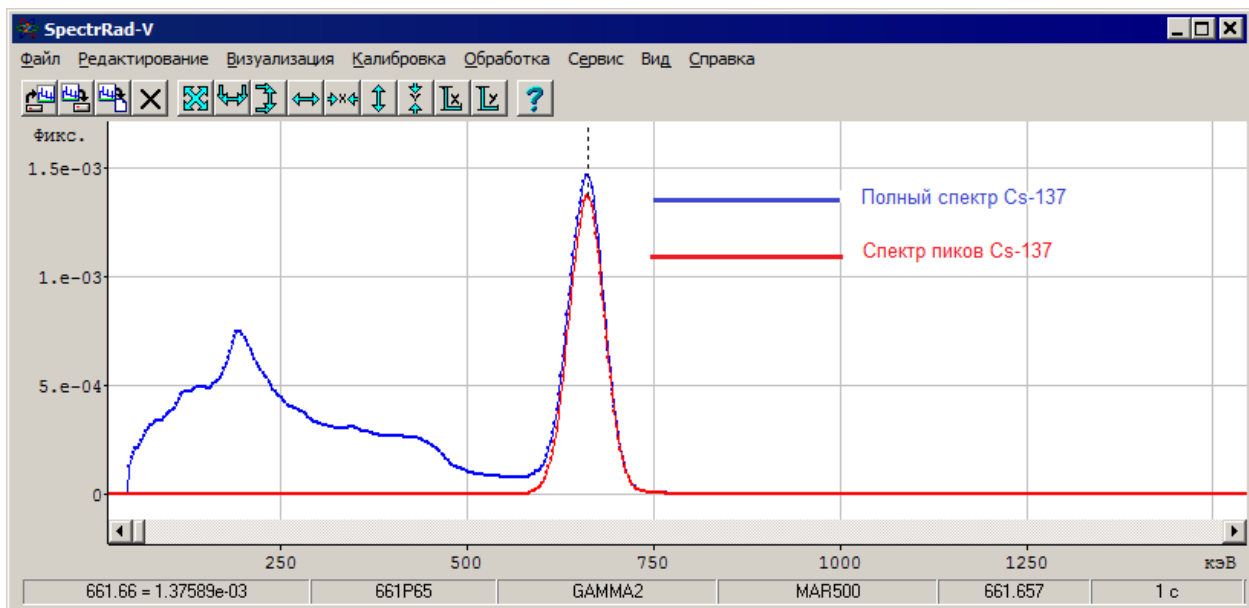
Пакет «СПЕКТРРАД» является надстройкой над штатным программным обеспечением спектрометров различных фирм (список поддерживаемого оборудования приводится в главе 3.1 «Спектрометр»). Управление измерениями производится с использованием штатного программного обеспечения спектрометров и программного пакета «СПЕКТРРАД». Обработка полученных спектров производится с использованием программного пакета «СПЕКТРРАД».

Методика расчёта активностей основана на разложении спектра в выбранном энергетическом диапазоне на спектры компонент в предположении, что измеренный спектр является суммой спектров нуклидов счетного образца (пробы) и спектра фона. Радионуклидный состав пробы полагается заранее известным¹.

Спектр компоненты (спектр излучения нуклида или цепочки нуклидов) для гамма спектров может быть полным – включающим спектр непрерывного рассеяния гамма квантов и тормозного рентгеновского бета частиц и неполным – с вычтенным спектром непрерывного рассеяния – спектром пиков. Для альфа, бета и альфа+бета спектров всегда используется полный спектр компоненты.

На рисунке ниже приведён пример полного спектра и спектра пиков Cs-137.

¹ Под известным нуклидным составом понимается не то, что оператор заранее знает, сколько и каких радионуклидов присутствует в пробе с активностями отличными от нуля, а то, что количество нуклидов, для которых проводится оценка активности при обработке спектра, ограничено. Для пакета «СПЕКТР» ограничение заключается в том, что оператор может указать в списке компонент декомпозиции не более 100 компонент (нуклидов и равновесных цепочек нуклидов), а в рабочей таблице нуклидов используемой процедурой предварительного анализа нуклидного состава не более 500 нуклидов и равновесных цепочек.



Полный спектр и спектр пиков Cs-137.

В пакете «СПЕКТРАД» реализовано два метода обработки: метод с предварительным вычитанием спектра непрерывного рассеяния (комптоновское рассеяние гамма квантов и тормозное рентгеновское бета частиц) и метод без вычитания спектра непрерывного рассеяния. Первый метод применим, прежде всего, для гамма спектрометров с хорошим разрешением детекторов (охлаждаемые полупроводниковые детекторы). Преимущество метода в том, что при этом существенно увеличивается обусловленность системы уравнений разложения спектра (спектр непрерывного рассеяния делающий все оцениваемые активности нуклидов коррелированными исключается из системы). Кроме этого расчёт² спектров пиков значительно проще и точнее, чем расчёт спектров, включающих спектры комптоновского рассеяния гамма квантов и тормозного рентгеновского бета частиц. Недостаток метода в том, что для корректного отделения спектра пиков от спектра непрерывного рассеяния необходимо выделение пика или группы пиков в спектре (участки спектра слева и справа от группы пиков не должны содержать пиков). При этом, для корректной аппроксимации спектра непрерывного рассеяния (полиномом или интегральной ступенькой) участок спектра с пиками не должен иметь большую протяженность (более десятка полуширин пиков³). Для сложных спектров это нередко невозможно реализовать даже для спектров, измеренных на детекторах с охлаждаемым полупроводниковым детектором. При этом модифицируется объект – спектр счётного образца, что не приветствуется теорией оценивания, отсчёты в каналах спектра становятся коррелированными и корректная оценка неопределённостей оценивания становится затруднительной – оценивание выходит из класса линейного, метрический тензор модифицированного пространства рассчитать практически невозможно. Появляются ошибки связанные с пропуском пиков и нахождением ложных пиков.

При втором методе могут использоваться полные отклики спектрометра, включающие и спектры всех пиков нуклидов, и спектр непрерывного рассеяния. Но могут использоваться в качестве компонент разложения и спектры пиков нуклидов без спектра непрерывного рассеяния. В этом случае модель дополняется сплайном, аппроксимирующим спектр непрерывного рассеяния для тех нуклидов, которые в списке компонент представлены спектрами пиков. То есть список компонент разложения может быть комбинированным. Дополнение системы уравнений сплайном приводит к увеличению числа неизвестных и, соответственно, к снижению эффективности оценивания. Для спектров с высоким

² Расчёт спектров компонент разложения по калибровкам спектрометра и таблице нуклидов.

³ Полуширина пика – ширина пика на половине высоты.

разрешением это снижение эффективности не велико, поскольку форма спектров пиков в этом случае существенно отличаются от спектра непрерывного рассеяния. Для слабо разрешённых спектров выбор разложения спектра только на полные спектры компонент или включение в список компонент и спектров пиков будет компромиссом между эффективностью оценивания и возможностью расчёта полных спектров компонент. Второй метод не модифицирует объект, оценивание остаётся в классе линейных оценок, поэтому наиболее корректно рассчитываются неопределённости оценивания.

Для удобства изложения первый метод будем называть «ППД методом» и спектрометрию, использующую первый метод - «ППД спектрометрией», а второй метод будем называть «сцинтилляционным» и спектрометрию, использующую второй метод, – «сцинтилляционной спектрометрией». Понятно, что «сцинтилляционная спектрометрия» в данном контексте является условным понятием, поскольку, например, вся альфа и бета спектрометрия, несмотря на тип детектора и разрешение альфа спектрометра, попадает в категорию «сцинтилляционная спектрометрия».

Предполагается, что спектр компоненты не изменяется от наличия в пробе других нуклидов или элементов, но зависит от геометрических факторов (геометрия измерений), химического состава вещества счётного образца (Z –заряда и A_m – атомной массы элементов) и плотности или массы счётного образца. При измерениях используются фиксированные геометрии, для каждой из которых проводится независимая калибровка. Перерасчёт полных спектров компонент для приведения в соответствие с плотностью электронов счётного образца (расчёт комптоновского рассеяния для гамма квантов, расчёт рассеяния для бета частиц) проводится путем интерполяции или экстраполяции по двум или более спектрам компонент рассчитанных для различных плотностей электронов. Если химический состав пробы или эталонов неизвестен и, соответственно, нельзя рассчитать плотность электронов, используется физическая плотность (масса счётного образца). Для расчёта спектров пиков и для полных спектров компонент, в том случае, если перерасчёт по эталонам разной плотности невозможен (есть только один спектр), используется расчёт ослабления излучения при прохождении излучения через вещество по таблицам сечений ядерных реакций в соответствии с данными <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>, либо по формуле предполагаемой теорией или заданной оператором.

Прямой расчёт полных спектров компонент из набора спектров эталонов является основным и включён в стандартную автоматизированную процедуру калибровки спектрометра для гамма и бета спектрометров.

Расчет полных спектров компонент, отсутствующих в наборе эталонов, основан на предварительном расчёте спектров откликов на отдельные линии и генерацию спектров по библиотеке нуклидов интерполяцией по рассчитанным спектрам линий. Для альфа спектрометрии такой расчёт полных спектров компонент обеспечивает необходимую точность и является основным при оценке активностей нуклидов. Для гамма спектрометрии практически невозможно корректно оценить погрешности расчёта спектра непрерывного рассеяния, поэтому, для гамма спектрометрии, метод расчёта полных спектров компонент по моделям линий является дополнительным и используется только для грубой оценки присутствия нуклидов в спектре.

При разложении гамма спектров на спектры пиков нуклидов, спектры пиков нуклидов рассчитываются по калибровкам спектрометра (спектры моделей пиков, энергетическая калибровка, калибровки эффективности регистрации квантов в пиках полного поглощения и пиках утечки, калибровка ширины пиков от энергии, калибровка формы пиков от энергии) и таблице линий. Поскольку процедура расчёта спектра пиков значительно проще и обеспечивает необходимую точность измерений, этот метод применяется для расчёта активностей нуклидов и в ППД гамма спектрометрии, и в сцинтилляционной гамма

спектрометрии (в сцинтилляционной гамма спектрометрии набор компонент может включать как полные спектры компонент, так и спектры пиков).

Процедура разложения спектра на компоненты использует помехоустойчивый метод, являющийся комбинацией метода наименьших квадратов с методом наименьших модулей дополненный априорными данными (данными прошлых измерений или измерений вещества пробы на другом спектрометре) в соответствии с методикой Байесовского оценивания. Оцениваемыми параметрами разложения являются активности нуклидов и параметры дрейфа спектрометра (дрейф нуля шкалы, дрейф коэффициента усиления, дрейф разрешения и параметр нелинейной деформации энергетической калибровки спектрометра).

Погрешность (неопределённость) измерений в программном пакете «СПЕКТРРАД» рассчитывается для каждого измерения по формуле $\Delta_{изм} = \sqrt{\Delta_{эт}^2 + \Delta_{пр}^2 + \Delta_{сл}^2}$.

Здесь $\Delta_{эт}$ – погрешность калибровки спектрометра связанная, прежде всего, с погрешностью аттестованных значений использованных при калибровке мер активности (погрешность средства измерения). Рассчитывается при калибровке спектрометра.

$\Delta_{пр}$ - погрешность пробоподготовки, нарушения геометрии измерений, погрешность определения массы счётного образца – погрешности связанные с измеряемым счётным образцом и методом измерений (погрешность метода). Задаётся оператором при настройке процедуры обработки спектра.

$\Delta_{сл}$ – случайная (статистическая) погрешность связанная со статистикой зарегистрированных отсчётов в каналах спектра пробы и спектра фона, с соответствием используемой модели измеренному спектру и алгоритмом расчёта активностей. Оценка случайной составляющей погрешности - расчет погрешностей Байесовского оценивания в предположении составного характера статистики измерений (Пуассоновская + линейная), дополненная погрешностями обрыва итерационного процесса (при оценке параметров дрейфа).

Результатами измерений по данной методике являются активности определяемых нуклидов и погрешности (неопределённости) значений активностей соответствующие доверительной вероятности 95%.

Подробно методика расчёта активностей и соответствующим им погрешностей приводится в приложении 1.

3. Средства измерений

3.1 Спектрометр

Пакет «СПЕКТРРАД» поддерживает спектрометры бета и гамма излучения, производимые наиболее известными Российскими и зарубежными фирмами:

- ООО «НТЦ Амплитуда»:
 - спектрометрический комплекс «МУЛЬТИРАД».
- ЗАО НПЦ «Аспект»:
 - спектрометр энергии гамма излучения сцинтилляционный ГАММА-1С,
 - спектрометр энергии гамма-излучения полупроводниковый ГАММА-1П,
 - спектрометры энергий бета-излучения сцинтилляционные БЕТА-1С, БЕТА-1С-150,
 - спектрометр энергий гамма и бета излучений сцинтилляционный ГАММА-БЕТА-1С.
- Группа предприятий (ГП) «Грин Стар»:
 - Одноплатный спектрометр SBS-75.
- ООО НПЦ «Доза»:
 - комплекс спектрометрический «Прогресс»,

- гамма-спектрометр сцинтилляционный «Прогресс-гамма»,
- бета-спектрометр сцинтилляционный «Прогресс-бета»,
- гамма-спектрометр «Прогресс-гамма (ППД)»,
- переносной гамма-бета спектрометр «Прогресс-БГ(П)»,
- портативный спектрометр СКС-99 «СПУТНИК».
- ООО «НТЦ "РАДЭК»:
- спектрометр - радиометр гамма- бета- и альфа-излучения МКГБ-01,
- спектрометр гамма-излучения на основе детектора из ОЧГ МКГБ-01 ППД.
- ЗАО «НТЦ Экспертцентр»:
- универсальный спектрометрический комплекс «Гамма Плюс».
- «Canberra Industries, Inc.» США:
- гамма-спектрометр многоканальный для измерения рентгеновского и гамма излучения CANBERRA.
- «ORTEC Products Group»:
- гамма спектрометры «ORTEC».
- «GBS ELEKTRONIK»:
- гамма и бета спектрометры.

Список поддерживаемого оборудования постоянно расширяется.

Программный пакет «СПЕКТРРАД» предназначен, прежде всего, для качественной обработки измеренных спектров и поэтому не заменяет, а дополняет штатное программное обеспечение спектрометров. Но поскольку обработка спектров может начинаться уже на этапе набора спектра (режим циклических измерений с коррекцией энергетического дрейфа), в пакете «СПЕКТРРАД» реализованы и функции управления работой спектрометра (запуск и остановка измерений, установка параметров спектрометра и т.п.). Штатное программное обеспечение перечисленных спектрометров предоставляет возможности такого управления спектрометром внешней программе. Набор спектра для отдельного цикла измерения при этом производится под управлением штатного программно-аппаратного комплекса.

Перечисленные спектрометры внесены в государственный реестр средств измерений, допущенных к использованию в Российской Федерации. Использование программного пакета «СПЕКТРРАД» не отменяет общих требований предъявляемым к средствам измерений и, хотя «СПЕКТРРАД» может быть установлен и на спектрометрах, не включённых в реестр средств измерений, ответственность за достоверность результатов измерений в этом случае разработчики программного пакета «СПЕКТРРАД» и авторы методики не несут. При проведении измерений сохраняются требования, изложенные в штатной документации на спектрометр и используется штатное вспомогательное оборудование и аксессуары: кюветы для экспонирования счётных образцов, весы и т.п.

Описание пакета («Руководство пользователя») и описание методик измерений и калибровки спектрометра поставляется как в виде файлов, являющихся составной частью пакета, так и в виде печатных документов.

3.2 Контрольный источник

Для проведения калибровки спектрометра (радиометра) по энергии и контроля за сохранностью параметров установки, спектрометр должен быть укомплектован контрольным источником.⁴ Контрольный источник должен иметь активность достаточную для набора в течение 100 – 300 секунд измерения в среднем не менее 50 импульсов на канал в рабочем диапазоне спектрометра и изготовлен на основе радионуклидов с большим временем жизни. Радионуклиды, используемые для контрольного источника, должны иметь достаточно

⁴ Как правило, стандартная комплектация спектрометра включает контрольный источник. Если, по каким-либо причинам, он отсутствует, контрольный источник требуется приобрести.

мощные линии излучения (граничные энергии для бета излучения) во второй половине используемого энергетического диапазона. Для сцинтилляционной гамма спектрометрии использующей диапазон от 100 до 3000 кэВ можно рекомендовать смесь Cs-137 и K-40, Th-232 или Na-22, для ППД спектрометрии, использующей диапазон от 30 до 2000 кэВ – смесь Eu-152 и Am-241, для бета спектрометров предназначенных для измерения активности Sr-90 – Sr-90 в состоянии радиоактивного равновесия с Y-90, для альфа спектрометров – смесь плутониев: Pu-238+Pu-240+Pu-242.

Поскольку измерения проб проводятся в разных геометриях, то параметр эффективности регистрации спектрометра для конкретной геометрии может измениться, например, при изменении положения детектора относительно счётного образца, поэтому для надёжного контроля параметров спектрометра рекомендуется иметь контрольные источники для каждой используемой геометрии.

3.3 Вспомогательное оборудование

При проведении измерений используется штатное вспомогательное оборудование спектрометра. Минимально требуемый набор включает кюветы для экспонирования счётных образцов, и весы. Поскольку погрешность взвешивания пробы и счётных образцов, приготовленных из материала пробы, входит составной частью в погрешность определения активностей, рекомендуется использовать весы обеспечивающие относительную погрешность взвешивания, не превышающую 3 %.

4. Установка программного пакета «СПЕКТРРАД» на спектрометр

Пакет «СПЕКТРРАД» может работать на компьютерах с операционными системами «Windows 98», «Windows 2000», «Windows XP», «Windows 7», «Windows 8», «Windows 10» и другими операционными системами семейства «Windows».

Установочный пакет «СПЕКТРРАД» скачивается с сайта <https://spectrrad.ru/index.php/download.htm>. Требуется скачать и запустить программу "SpectrRad-xxx.exe", где xxx – код версии пакета связанный с фирмой производителем спектрометра.

Процесс установки пакета не требует пояснений – оператору требуется только задать установочную папку пакета.

Для работы пакета требуется наличие лицензионного файла: SetupLicense.key (установочная лицензия) или License.key (файл продления лицензии), приобретаемого у автора пакета. Данный файл рекомендуется переписать в установочную папку пакета. При первом запуске пакета программа потребует указать расположение такого файла, если его не удалось найти в установочной папке пакета.

После установки пакета необходимо подключить к пакету штатное программное обеспечение спектрометра. Для подключения воспользуйтесь руководством пользователя программного пакета «СПЕКТРРАД» (раздел «Установка драйвера спектрометров»).

Организация или частное лицо, для которого легально установлен на спектрометр программный пакет «СПЕКТРРАД», включается в реестр пользователей программного пакета «СПЕКТРРАД».

5. Условия проведения измерений

Условия проведения измерений должны соответствовать требованиям, предъявляемым к эксплуатации спектрометра (радиометра).

6. Требование к технике безопасности и квалификации оператора

К выполнению измерений допускаются специалисты с квалификацией инженера -

физика или техника (лаборанта) изучившие руководство пользователя программного пакета «СПЕКТРРАД» и настоящую методику. Наряду с инструктажем по работе с радиометрической и спектрометрической аппаратурой специалисты должны пройти обязательное обучение практическому применению методики.

При проведении измерений должны соблюдаться требования безопасности, принятые на предприятии, а также санитарные правила СанПин 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» и «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010».

7. Метрологическое обеспечение

После установки программного пакета «СПЕКТРРАД» на спектрометр (радиометр) должна быть проведена в установленном порядке его калибровка и первичная поверка (метрологическая аттестация). Калибровка и настройка спектрометра, создание шаблонов обработки подробно описаны в руководстве пользователя программного пакета «СПЕКТРРАД».

Установку пакета и калибровку спектрометра имеют право проводить авторы пакета, либо лица, прошедшие обучение и допущенные к данной работе в установленном порядке. Калибровочные данные, характеризующие зависимость энергетического разрешения, формы пиков, эффективности регистрации квантов излучения от энергии, плотности счётного образца, геометрических параметров, и рассчитанные спектры откликов спектрометра на единицу активности нуклидов, использованных при калибровке образцовых мер активности, заносятся в программу обработки спектров.

Калибровка спектрометра для работы под управлением программного пакета «СПЕКТРРАД» оформляется свидетельством о калибровке.

В свидетельстве о калибровке указываются следующие метрологические характеристики:

- Перечень аттестованных геометрий⁵ измерений.
- Перечень измеряемых радионуклидов для каждой геометрии.
- Значения систематической составляющей погрешности измерений.
- Запас точности для оценок случайной составляющей погрешности измерений.
- Значения нижнего предела диапазона измерений определяемых нуклидов для каждой из используемых геометрий.
- Диапазон допустимых значений плотности счётных образцов для всех аттестованных геометрий измерений гамма спектрометра и диапазон допустимых значений массы счётных образцов для всех аттестованных геометрий измерений бета спектрометра.
- Используемый энергетический диапазон.
- Энергетическое разрешение спектрометра.⁶
- Интегральное значение интенсивности фона в используемом энергетическом диапазоне и коэффициент изменчивости фона.
- Активность нуклидов контрольного источника на дату калибровки.

После калибровки проводится первичная поверка спектрометра. Поверка должна осуществляться органами государственной метрологической службы Росстандарта или метрологическими службами юридических лиц, аккредитованными в установленном порядке на право проведения поверки спектрометрических средств измерений. Поверка спектрометра для работы под управлением программного пакета «СПЕКТРРАД» оформляется свидетельством о поверке.

В свидетельстве о поверке должны быть подтверждены указанные в свидетельстве о

⁵ Аттестованная геометрия – геометрия, для которой проведена калибровка спектрометра.

⁶ Только для альфа и гамма спектрометров.

калибровке метрологические характеристики спектрометра.

8. Подготовка к измерениям

Перед проведением измерений необходимо выполнить процедуры, требуемые штатной инструкцией по эксплуатации спектрометра (как правило, требуется прогреть аппаратуру, включив питание детекторов и компьютера, в течение не менее чем 30 минут).

После проведения требуемых процедур, необходимо провести уточнение параметров энергетической калибровки спектрометра и поверку спектрометра по контрольному источнику (контрольным источникам). Для этого в пакете предусмотрена **процедура автокалибровки** - процедура измерения, поставляемого вместе со спектрометром, калибровочного контрольного источника (источников), автоматического уточнения параметров энергетической калибровки по результатам обработки измеренного спектра и сравнение оценённой активности нуклидов контрольного источника с аттестованными значениями. Автокалибровку спектрометра требуется проводить периодически. Частота проведения зависит от стабильности тракта спектрометра, но не может быть реже, чем раз в день. Рекомендуемая периодичность автокалибровки устанавливается в параметрах настройки при калибровке и настройке спектрометра и, в соответствии с установкой, программа будет напоминать оператору о необходимости проведения автокалибровки, поверки спектрометра.

Следующая необходимая процедура - **контроль фона спектрометра**. Для этого в программе также предусмотрена автоматизированная процедура, подобная процедуре автокалибровки. Периодичность контроля фона задаётся в параметрах настройки, и программа будет напоминать оператору о необходимости проведения контроля фона через заданное время. В параметрах настройки задаётся текущее время измерения фона и суммарное время накопления спектра фона. Необходимо помнить, что суммарное время накопления фона должно не менее чем в два раза превышать максимальное время измерения рабочих проб. Поэтому, если предполагается проведение длительных измерений, необходимо скорректировать максимальное время накопления спектра фона и предварительно или, чередуя измерения пробы с измерениями фона (но до момента обработки спектра пробы), накопить необходимое суммарное время измерения фона.

Программа контролирует результаты выполнения процедур «**автокалибровка**» и «**контроль фона**» и при отрицательных результатах запрещает проведение рабочих измерений.

В пакете «СПЕКТРРАД» результаты измерений контрольного источника и фона сохраняются в отдельном архиве «**Поверка**». Кроме оценок активностей и погрешностей нуклидов контрольного источника сохраняются более 10 параметров, характеризующих работоспособность спектрометра, в том числе четыре параметра энергетического дрейфа и два параметра стабильности фона. В процессе эксплуатации спектрометра становится ясно, насколько стабилен или нестабилен фон в спектрометре и параметры спектрометрического тракта. Соответственно, оператор может скорректировать методику проведения измерений: максимальное время накопления фона, периодичность контроля фона, периодичность автокалибровок, режим обычных или циклических измерений с коррекцией дрейфа спектрометра.

Подробно процедуры автокалибровки и контроля фона описаны в руководстве пользователя пакета.

9. Требования к счетным образцам

Счетный образец может быть приготовлен как из нативного материала, так и с использованием методов физического (озоление, выпаривание, высушивание и т.п.) и химического концентрирования или селективной радиохимической экстракции и

электролитическом осаждении при подготовке проб для альфа спектрометрии.

При приготовлении счетного образца для гамма и бета спектрометрии необходимо заполнять измерительный сосуд веществом пробы в строгом соответствии с одной из аттестованных геометрий.

При измерении концентрированного образца для расчета содержания радионуклидов в исходной пробе программа использует значения количества исходной пробы⁷, массы полученного из него концентрата, химический выход (при химическом концентрировании) и массы счетного образца, которые необходимо знать и ввести по запросу программы перед началом измерения. По значениям количества исходной пробы, массы концентрата и химического выхода программа рассчитывает коэффициент концентрации (коэффициент пересчёта).

При измерении нативной пробы в программу вводится только масса счетного образца.

10. Выполнение измерений

При проведении рутинных измерений на настроенном на конкретный набор спектрометрических трактов и аттестованных геометрий спектрометре, работающем под управлением пакета «СПЕКТРРАД», вполне достаточно пунктуально следовать приведенной в руководстве пользователя программного пакета «СПЕКТРРАД» инструкции.

Измерения проб проводятся в фиксированной аттестованной геометрии. **Проведение измерений с использованием не аттестованных геометрий недопустимо.**

После запуска измерений, в случае, если включено окно состояния анализаторов (пункт меню "Измерение / Состояние"), в окне состояния появляются сообщения о времени измерения, загрузке спектрометра, остаток времени до окончания измерений. В случае если загрузка больше установленного уровня, загорается желтый или красный индикатор перегрузки спектрометра. В этом случае необходимо разбавить рабочую пробу неактивным наполнителем и повторить измерения.

При обработке измеренных спектров необходимо использовать один из созданных предварительно шаблонов обработки. Создание шаблонов обработки подробно описано в руководстве пользователя (гл. «Создание шаблонов декомпозиции»). Ряд стандартных шаблонов обработки поставляется вместе с пакетом. Они могут служить заготовкой для создания рабочих процедур обработки.

Можно отметить возможность использования результатов обработки проведенных ранее измерений той же пробы или пробы из того же материала. Результат будет тот же, что и при обработке спектра с суммарным временем измерения, но в качестве априорных данных можно использовать результаты обработки проб, измеренных на различных спектрометрах и в различных геометриях, концентрированных или разбавленных проб при обработке нативных проб.

⁷ Под количеством пробы понимается масса, объём или площадь пробы.

10.1 Режим циклических измерений

Случайная составляющая полной погрешности оценок активностей в спектрометрии уменьшается при увеличении продолжительности накопления спектра. В то же время при большой продолжительности измерения дрейф параметров спектрометра в течение времени измерения пробы может существенно исказить спектр. В этом случае рекомендуется пользоваться процедурой циклических измерений с коррекцией энергетического дрейфа:⁸

Скриншот диалогового окна «Запуск измерений». В окне заданы следующие параметры: Спектрометр — ГАММА, Геометрия — MARINELI, Продолжительность цикла, секунд — 1800, Живое — Живое. В разделе «Начало измерений» выбран вариант «С задержкой, секунд» со значением 0, а также «По таймеру» с датой 14.11.2009 и временем 15:24:19. Проверены следующие флажки: «Сохранить результаты измерений в архиве», «Очистить буфер АЦП», «Режим наблюдения через 3 сек.», «Циклические измерения». В поле «Число циклов» задано значение 10. В нижней части окна расположены кнопки «Ввод», «Отмена» и «Справка».

Программа циклических измерений требует задания длительности цикла и числа циклов. Длительность цикла должна быть компромиссом между требованием накопления достаточной для процедуры коррекции дрейфа статистики и требованием быть покороче, чтобы минимизировать дрейф в течение цикла. Обычно продолжительность цикла устанавливается равной продолжительности рутинных измерений.

Если запуск измерений производится из окна архива измерений, оператор может продолжить накопление информации в выбранный файл, что позволяет провести дополнительные измерения пробы.

Перед началом циклических измерений требуется провести процедуру автокалибровки спектрометра.

⁸ Картинки, приведённые в тексте, являются примерами форм, которые оператору необходимо заполнить или что-то выбрать из предлагаемых списков, выполняя какие-либо процедуры при работе с пакетом «СПЕКТРАД».

В пакете «СПЕКТРАД» есть несколько режимов циклических измерений:

В режиме **«Суммирование спектров, сохранение итоговой суммы»** происходит накопление информации в спектре, сохраняемом в архиве измерений. При установке режима **«Сравнение спектров»** спектр последнего цикла сравнивается с накопленным спектром. Если задан **режим коррекции дрейфа**, предварительно производится коррекция энергетического дрейфа. При невыполнении условий сравнения (невязка больше заданной) измерения будут остановлены, и программа предложит оператору решить: продолжить или прекратить измерения. Если оператор решит прекратить измерения, последний неудачный цикл не будет суммироваться с накопленным спектром, а будет сохранён в отдельном файле. При решении продолжить измерения спектры будут сложены и измерения продолжены.

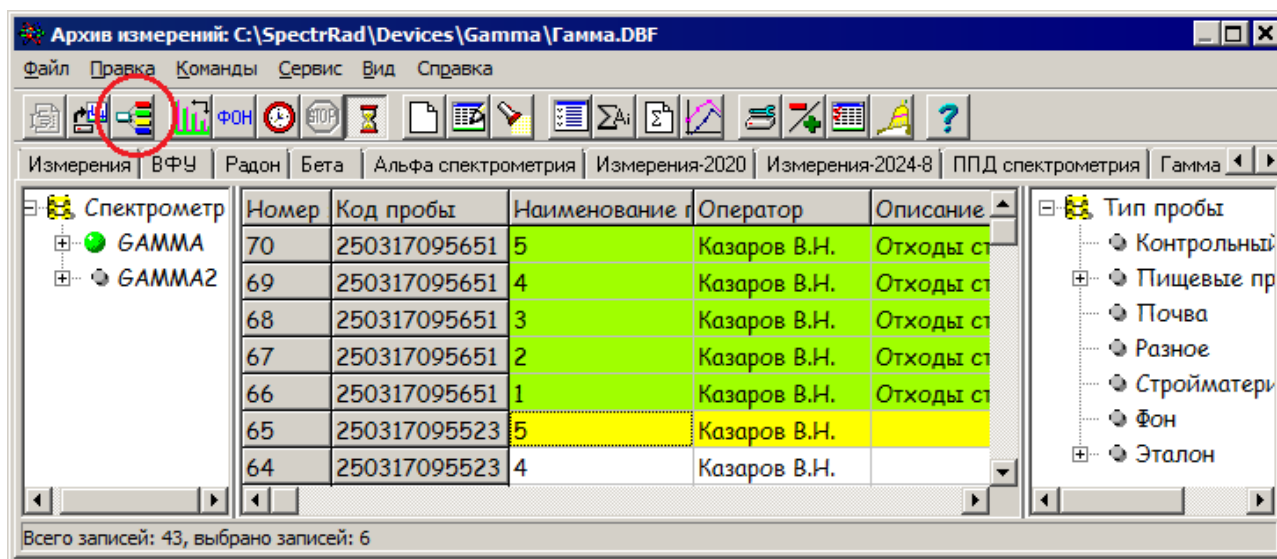
Режим **«Суммирование спектров, сохранение всех сумм»** обладает большей защищенностью от сбоев компьютера – один файл с накапливаемым спектром можно потерять при сбое компьютера, вероятность потерять все файлы значительно меньше. Кроме этого этот режим используется для целей наладки, настройки спектрометра (можно отслеживать деформацию спектра во время набора).


Режим **«Сохранение всех спектров»** сохраняет все циклы измерений в отдельных файлах архива.

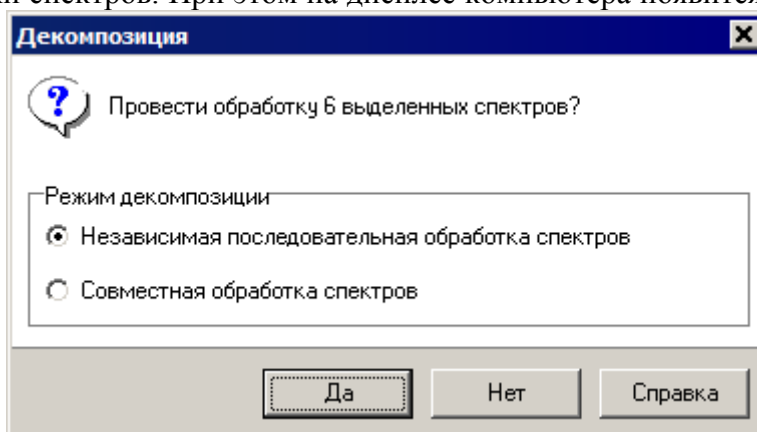
Режим **«Сохранение всех спектров, сохранение итоговой суммы»** является объединением первого и последнего режима.

11. Групповая обработка спектров из архива измерений


Значительный выигрыш в точности оценивания можно получить при обработке группы спектров, предварительно отмеченных оператором в журнале измерений.



Нажатие на клавишу  (пункт меню «Команды / Обработать спектр...») вызывает процедуру групповой обработки спектров. При этом на дисплее компьютера появится форма



для выбора режима обработки:

При выборе **независимой последовательной обработки спектров** выигрыш в точности измерений мы получим, объединив результаты обработки процедурой формирования **суммарного отчёта** .

В этом режиме происходит усреднение результатов методом наименьших квадратов, случайные (статистические) погрешности оценки средневзвешенного для активностей уменьшаются в $\sim\sqrt{n}$ раз (n – число записей).

Для «сцинтилляционной» спектрометрии такой подход эффективнее, чем накопление спектра с большим временем измерения, поскольку отсутствует деформация спектра вследствие некомпенсированного энергетического дрейфа, алгоритм коррекции дрейфа в процедуре декомпозиции мощнее, чем аналогичный в процедуре циклических измерений, не требуется обеспечивать большое время накопления спектра фона. Для «ППД спектрометрии» этот приём не всегда хорош вследствие нелинейности оценок активностей. При малых временах измерения пики нуклидов с малой активностью не будут замечены процедурой поиска пиков, а в режиме суммирования они станут через какое-то время заметны.

Наиболее эффективен режим **совместной обработки спектров**. В этом режиме для

всех выбранных записей (а можно выбрать до 100 записей измерений одного и того же счётного образца, проведённых в разное время) формируется общая система уравнений. В этом режиме дополнительно к увеличению общей статистики, учитываются процессы распада и накопления нуклидов в счётном образце. В итоге обусловленность системы повышается, что позволяет повысить эффективность оценок и решать системы, которые были бы вырожденными без учёта дополнительной информации о скорости распада различных нуклидов в счётном образце.

12. Форма отчета о результатах обработки

В пакете «СПЕКТРРАД» большое внимание уделено формированию отчётов о результатах обработки спектров проб. Подробно формирование отчётов описано в руководстве пользователя пакета «СПЕКТРРАД» (гл. «Создание шаблонов декомпозиции»). В данной методике мы напомним об основных понятиях связанных с формированием отчётов. Отчёт может формироваться в двух вариантах: отчёт для печати в виде документа MS Word и внутренний отчёт. Внутренний отчёт формируется всегда. Отчёт для печати формируется при задании требования его создания в параметрах настройки отчёта. Оба отчёта сохраняются в архиве измерений. Базовая форма внутреннего отчёта может иметь следующий вид (в качестве примера приведён отчёт обработки спектра реальной пробы):

"SpectrRad"	Версия 16.0.0	13.12.2024
Файл:	C:\SpectrDemo\ППД	
	спектрометрия\ISO\0906101429230_0.ISO	
Спектрометр:	Полупроводниковый гамма спектрометр N 1902-94	
Свидетельство о поверке:	N 48810.21952. Действительно до 24.04.2003 г.	
Геометрия:	"Дента" 0.1 л.	
Шаблон обработки:	"Неравновесные_ЕРН"	
Таблица нуклидов:	"Nuclides\U-nat.ncl"	
Код пробы:	F0788/37372	
Оператор:	Лисунова В.В.	
Тип пробы:	Материалы с повышенным ЕРН	
Описание пробы:	Вольфрамово-ториевые электроды W T20	
Место отбора:	ООО "АБИКОР БИНЦЕЛЬ Сварочная Техника". 129343, г.Москва, ул. Уржумская, д.4.	
Примечание:	Большое Z эффективное. Сравните обработку с варьированием поглощения и без варьирования.	
Масса счётного образца:	65 г	
Дата измерения:	10.06.2009 13:29:23	
Время измерения:	1526 с	

Нуклид	Интенсивность (%) \ Невязка	Активность (Бк/кг)	Неопределённость (Бк/кг) (%)	
<i>Am-241</i>	<i>0 \ 7.8</i>	<i>< 6000</i>		
Be-7	0 \ 1.4	< 1800		
Cs-134	0 \ 1.4	< 180		
Cs-137	0 \ 0.0	< 280		
K-40	0 \ 1.8	< 2400		
Ra-226	0 \ 1.9	< 3000		
Rn-222	0 \ 1.8	< 400		
Th-228	71.6 \ 2.2	47100	3500	7.9
Th-232	18.7 \ 1.9	18200	1600	8.7
U-nat	0 \ 1.7	< 2700		

Нуклиды:	99%
Фон:	0%
Модель:	99% от общей интенсивности пиков 48.7 имп./сек.
Комптон:	151 имп./сек.
Невязка:	1.8 /2.2 /0.0 (Норма - не более 3)

Энергетический диапазон: 40 - 1800 кэВ.

Дрейф: Общий лин. 0.159% ($K_{\gamma}=1$, $H_{sh}=12.7$ кан.), Текущий $1.76e-04\%$, Нелин. 0%, Разрешения 0%

Z_{eff} : 7.2+50.0, Толщина пробы 15.0+13.1 мм.

Активности приведены на 10.06.2009 13:29:23

Интенсивности приведены усреднённые за время измерения.

Недостовверные записи отмечены красным курсивом

Здесь:

- **F0788/37372** - шифр пробы⁹,
- **Интенсивность(%)\Невязка** - вклад в спектр в исследуемом энергетическом диапазоне (в процентах) зарегистрированных импульсов от данного нуклида, парциальная невязка (невязка для данного нуклида) процедуры декомпозиции.
- **Активность(Бк/кг)** – удельная активность нуклида в беккерелях на килограмм.
- **Неопределённость (Бк/кг)** - погрешность измерений в беккерелях на килограмм. Погрешность соответствует 95% доверительной вероятности.
- **Неопределённость (%)** - погрешность в процентах к активности нуклида.
- **< - знак "меньше"** для активностей менее минимально измеряемой активности.
- **Нуклиды** - суммарная оцененная интенсивность излучения от нуклидов в указанном энергетическом интервале.
- **Фон** - интенсивность излучения фона.
- **Модель** - сумма фонового излучения и оценки вклада нуклидов, нормированная на зарегистрированную интенсивность излучения от пробы.
- **Комптон** – интенсивность спектра непрерывного рассеяния.
- **Невязка** - нормированное на предполагаемую величину отклонение рассчитанной модели от измеренного спектра. Приводятся три значения: общая невязка, невязка декомпозиции и отклонения оценённых значений активностей от заданных. Если априорные активности не заданы – значение третьей невязки равно нулю.
- **Энергетический диапазон** - левая и правая границы энергетического диапазона спектра использованные при обработке.
- **Дрейф** - энергетический дрейф спектрометра, оцененный по результатам обработки.
- **Zeff, толщина пробы** – начальные значение Z эффективное и эффективной толщины счётного образца и уточняющие значения, полученные процедурой варьирования.

Оценки активностей и неопределённостей (погрешностей) в отчётах могут быть представлены либо на дату начала измерения, либо на дату заданную оператором (дату отбора пробы, дату начала или окончания экспозиции и т.п.) по выбору оператора. Конкретная дата представления значений при необходимости приводится в отчёте.

Значения активностей приводятся либо для счётного образца, либо для «сырой» пробы в зависимости от настройки отчёта. В том случае, если активности приводятся для «сырой» пробы в отчёте приводятся сведения о количестве исходного материала, массе концентрата и массе счётного образца. Для активностей счётного образца приводится только масса счётного образца, если она указана в параметрах пробы.

Значения активностей приводятся либо в виде удельной активности пробы (нормировка может быть на массу, объём или площадь пробы), либо в виде общей активности пробы.

Форма представления активностей и погрешностей: точность округления, количество цифр в значениях, вывод в виде **Активность±Погрешность** (например: 20 ± 10) или

⁹ Название терминов и параметров: "Спектрометр", "Геометрия", "Проба", "Описание пробы", "Место отбора", "Примечание", "Размер пробы" при формировании отчета копируют названия колонок архива измерений, которые могут устанавливаться оператором.

менее $\max(\text{МИА}, \text{Активность} + \text{Погрешность})$ (например: < 30) задаются в параметрах настройки отчёта.

Величины невязки и интенсивности модели определяют достоверность разложения (декомпозиции) спектра. Понятно, что наилучшими величинами являются: 1.0 для невязки и 100% для модели, рассчитанной на дату проведения измерений. Отклонения в геометрии измерений, не соответствие плотности пробы плотностям эталонов, перегрузка спектрометра, не компенсированный энергетический дрейф, наличие неучтенных нуклидов в пробе или нарушение радиоактивного равновесия в цепочках нуклидов, предполагаемых равновесными, приводят к увеличению невязки. **Значительное увеличение невязки, выше выбранного опытным путем и установленного уровня (обычно 2.0), говорит о недостоверности разложения и вероятном присутствии неучтенных нуклидов.**

Принцип создания отчёта для печати заключается в замене специальных меток в предварительно подготовленном документе MS Word (шаблоне отчёта) данными из результатов обработки, параметрами пробы, данными о спектрометре и организации. Набор меток используемых при формировании отчёта приведён в гл. «Метки шаблона отчёта» руководства пользователя. Требуемый для формирования отчёта шаблон отчёта выбирает процедура программируемого калькулятора в используемом шаблоне обработки спектра. Выбор шаблона отчёта определяется группой типа пробы (например, группа «1.Продовольственное сырье и пищевые продукты» определяет что будет использоваться шаблон отчёта для продовольственного сырья и пищевых продуктов) и выполнение или невыполнение требований нормативов (СанПиН или Т Р и т.п.). Подробно создание программ калькулятора описаны в гл. «Калькулятор» руководства пользователя. Примеры шаблонов отчётов приведены в приложении 2.

Расчёт активностей и оценка погрешностей

Методика расчёта активностей основана на разложении спектра в выбранном энергетическом диапазоне на спектры компонент в предположении, что измеренный спектр является суммой спектров нуклидов счетного образца (пробы) и спектра фона. Нуклидный состав пробы полагается либо заранее известным, либо определяется процедурами предварительного анализа. Предполагается, что спектр компонента не изменяется от наличия в пробе других нуклидов или элементов, но зависит от геометрических факторов (геометрия измерений), плотности и эффективного атомного номера вещества счётного образца.

Метрика

Распространенный подход в оценивании – найти такие параметры p_x модели $M(p)$ (p – вектор оцениваемых параметров модели), которые имели бы минимальные дисперсии $D_{p_x} = \min(D_p)$ и удовлетворяли условию $\|M(p_x) - S\| < E$ ($\|\dots\|$ - обозначение нормы вектора, S - объект, в нашем случае, - измеренный спектр, E - заданный порог приемлемости модели). Для класса линейных оценок (и для несколько более широкого класса в случае нормальности $M(p) - S$) эти два условия объединяются в одно $\|K_x^{-1/2} \cdot (M(p_x) - S)\| = \min \|K_x^{-1/2} \cdot (M(p_x) - S)\|$.

Здесь K – ковариационная матрица вектора $M(p) - S$.

Использование в качестве нормы $\|\dots\|$ евклидовой длины и, соответственно, в качестве процедуры – метода наименьших квадратов обеспечило бы нам минимальные дисперсии оценок, но только при выполнении предположения о заранее известной ковариационной матрице K . Метод наименьших квадратов является весьма неустойчивой, по отношению к нарушениям исходных предположений, процедурой и поэтому в настоящее время используются различного рода помехоустойчивые (робастные) методы оценивания. Широко распространено оценивание Хуберовского типа (Huber estimation), которое используется и в нашей программе. Норма в Хуберовской метрике (Huber metric) выглядит следующим образом:

$\|\dots\| = (M(p) - S)^2$ в случае $0 > C_a < (M(p) - S) < C_b > 0$ - наименьшие квадраты при небольшом отклонении.

$\|\dots\| = |M(p) - S|$ в случае $0 > C_a > (M(p) - S)$ или $(M(p) - S) > C_b > 0$ – наименьшие модули при отклонениях превышающих заданный порог.

В нашей методике $C_a = -m \cdot G$, $C_b = n \cdot G$, где G – предполагаемое среднеквадратичное отклонение, значения m и n задаются в параметрах декомпозиции (m и n могут быть заданы равным ∞ , в этом случае оценка будет МНК оценкой).

Объект

Мы предполагаем, что спектр S имеет диагональную ковариационную матрицу $K_s = D_s \cdot I$ (I – единичная матрица, D_s – вектор дисперсий) причем $D_{S_i} = S_i + \eta^2 S_i^2$ для $S_i > 0$ и $D_{S_i} = 1$ для $S_i = 0$

Здесь:

S_i – количество отсчётов в i – том канале спектра S ,

η – коэффициент линейной составляющей статистики ($0 < \eta < 1$). То есть спектр имеет составную: пуассоновскую плюс линейную статистику. Для спектра пробы η определяется дифференциальной нелинейностью спектрометра.

Модель

Мы полагаем

$$M(p, i) = \left\{ \int (\Phi(x, w) \cdot f \cdot (a_0 \cdot (i-x)^2 + b_0 \cdot (i-x) + c_0) + k(Z, i) \cdot \sum A_j \cdot f_j (a_j \cdot (i-x)^2 + b_j \cdot (i-x) + c_j)) \cdot dx \right\} + S_{comp_i}(i) + Pn(i)$$

$$p = (Z, w, a_0, b_0, c_0, A_1, a_1, b_1, c_1, \dots, A_n, a_n, b_n, c_n, Pn_0, \dots, Pn_k).$$

Здесь:

$f_0 = B - B_{comp_i}$ – спектр фона с вычтенным спектром непрерывного рассеяния (B_{comp_i} включается в модель только в режиме обработки гамма спектров с выделением пиков).

f_1, \dots, f_n – спектры компонент (нормированные на распад нуклида спектры излучения отдельных нуклидов или цепочек нуклидов, находящихся в состоянии радиоактивного равновесия).

A_1, \dots, A_n – амплитуды соответствующих компонент.

$a_0, \dots, a_n, b_0, \dots, b_n$ и c_0, \dots, c_n – параметры энергетического дрейфа спектрометра.

Множитель $k(Z, i) = (1 - \exp(-\mu \cdot \rho \cdot Z^4 \cdot \Delta / f(E(i)))) / (\mu \cdot \rho \cdot Z^4 \cdot \Delta / f(E(i)))$ используется только в режиме обработки гамма спектров с выделением пиков. Z - отклонение условного Z эффективное пробы от Z эффективное эталона использованного при расчёте эффективности регистрации. $E(i)$ - энергия канала i . μ - линейный коэффициент поглощения. ρ - плотность счётного образца. Δ - толщина счётного образца (задаётся при установке геометрии).

$S_{comp_i}(i)$ – спектр непрерывного рассеяния для спектра пробы (спектр непрерывного рассеяния включается в модель только в режиме обработки гамма спектров с выделением пиков).

$Pn(i)$ - сплайн. Сплайн используется при разложении гамма спектра на спектры пиков для аппроксимации спектра непрерывного рассеяния в том случае, если не производилась предварительная обработка спектра для поиска пиков и расчёта спектра непрерывного рассеяния ($S_{comp_i}(i) = 0$).

i - канал спектра.

Свёртка с функцией рассеяния $\Phi(x, w)$ моделирует ухудшение разрешения спектрометра. В качестве функции рассеяния, за исключением альфа спектрометрии, используется гауссиан $\exp(-(x/w)^2)$. Для альфа спектрометрии используется свёртка с откликом спектрометра на квант излучения - моделью пика $S((x-p)/w)$.

Используется нелинейная модель, так как в сцинтилляционной спектрометрии (и не только в сцинтилляционной) пренебрегать энергетическим дрейфом спектрометрических трактов нельзя (обычный рабочий дрейф в пределах 1-3% для сцинтилляционных спектров вызывает искажение оценок в несколько раз превышающее оцененные статистические погрешности даже при 3 – 4 компонентах в модели). В общем случае предполагаются независимые значения параметров дрейфа для всех компонент, поскольку измерение эталонов происходило в разное время и при различной загрузке спектрометра, соответственно - при различных значениях коэффициентов усиления и нуля шкалы спектрометра. В том случае, если с помощью процедур предварительных энергетических калибровок при измерениях эталонов, мы добились, в какой-то степени, единой

энергетической шкалы для всех компонент разложения, оператор может указать в табличке параметров декомпозиции, что спектры компонент находятся в единой шкале, то есть $a_0 = a_1 \dots = a_n = 0$, $b_0 = b_1 \dots = b_n$, $c_0 = c_1 \dots = c_n$. Оператор может исключить из списка параметров Z, w , a_0, a_1, \dots, a_n и (или) b_0, b_1, \dots, b_n и (или) c_0, c_1, \dots, c_n и Pn , удалив соответствующие галочки в таблице параметров декомпозиции.

При оконном методе обработки, который неплохо работает при разложении линейчатых спектров с высоким разрешением регистрирующего детектора (гамма спектрометрия с охлаждаемыми ППД детекторами), используется линейная модель

$$M(p, i) = f_0(i) + \sum A_j \cdot f_j(i) + Comp(i); \quad p = (A_1, \dots, A_n).$$

Здесь i – номер окна, $f_0, f_1, \dots, f_n, Comp(i)$ – интегральные значения в i -ом окне, соответственно, фона, компонент и спектра непрерывного рассеяния.

При разложении спектров можно использовать значения активностей нуклидов для одного и того же материала пробы, измеренные на других спектрометрах или полученные другими методами. Модель при этом дополняется информацией о таких априорных данных в соответствии с принципом Байесовского оценивания для систем уравнений: $X = X_0$; $K_x = G_0$.

X – значения активностей, K_x – ковариационная матрица X .

Решение

Используем метод Гаусса – Ньютона. Начальное значение вектора параметров p^0 находим, используя глобальное варьирование выбранных параметров в заданном диапазоне с заданным шагом. Быстродействие современных компьютеров, пока что не позволяет варьировать все параметры с достаточной плотностью сетки, поэтому оператор может задать в параметрах декомпозиции варьирование пяти основных параметров: Z эффективное, эффективной толщины счѐтного образца, коэффициента усиления, нуля шкалы спектрометра и разрешения спектрометра. Найденное приближение уточняем, используя ньютоновский процесс.

$$p^{k+1} = p^k + R \{ \lambda_k \cdot (M_{jl} + \beta_k \cdot D_{jl} + G_0^{-1})^{-1} \cdot F \}$$

Здесь:

p^k – вектор параметров на k -ой итерации;

p^{k+1} – вектор параметров на $k+1$ -ой итерации.

R – оператор проектирования получаемых значений параметров на ограничения.

λ_k – шаг на k -ой итерации ($0 < \lambda_k < 1$).

$$M_{jl} = (W \cdot \frac{dM}{dp})^T \cdot (W \cdot \frac{dM}{dp}) - \text{матрица Гаусса - Ньютона};$$

$W = K^{-1/2}$ – матрица весов. K – ковариационная матрица вектора $M(p) - S$

$\beta_k \cdot D_{jl}$ – коэффициент (задается в параметрах декомпозиции) и демпфирующая матрица k -ого шага.

G_0 – ковариационная матрица априорных данных.

$$F = (W \cdot \frac{dM}{dP})^T \cdot (M(p) - S) + G_0^{-1} \cdot (A^k - X_0 \cdot b^k) \text{ для } 0 > C_a < (M(p) - S) < C_b > 0.$$

$$F = (W \cdot \frac{dM}{dP})^T \cdot C_a + G_0^{-1} \cdot (A^k - X_0 \cdot b^k) \text{ для } (M(p) - S) < C_a < 0.$$

$$F = (W \cdot \frac{dM}{dP})^T \cdot C_b + G_0^{-1} \cdot (A^k - X_0 \cdot b^k) \text{ для } (M(p) - S) > C_b > 0.$$

X_0 - априорные данные об активностях компонент.

A^k - оценка вклада компонент на k -ом шаге,

b^k - оценка коэффициента усиления тракта.

C_a, C_b - границы МНК оценивания.

Средняя за время измерения активность k -ого нуклида:

$$\bar{X}_k = \left(\int_{El}^{Er} k(Z^n, e) \cdot A_k^n \cdot f_k(p^n) \cdot de / \int_{El}^{Er} f_k(p_0) \cdot de \right);$$

Здесь:

El, Er - левая и правая энергетические границы декомпозиции, e - энергия;

$p^n = (w, a_j, b_j, c_j)$ - значения параметров энергетического дрейфа на последней итерации;

p_0 - начальные значения параметров энергетического дрейфа: $w = 0, a = 0, b = 1, c = 0$

A_k^n - оценка вклада k -ой компоненты на последнем шаге,

f_k - спектр k -ой компоненты (нормированный на распад нуклида спектр излучения нуклида или цепочки нуклидов, находящихся в состоянии радиоактивного равновесия);

Значения активностей на момент начала измерений для одиночных нуклидов, нуклидов равновесных цепочек и материнских нуклидов цепочек распада:

$$X_k = \bar{X}_k \cdot (1 - \exp(-\lambda_k \cdot T_{meas})) / (\lambda_k \cdot T_{meas}). \text{ Здесь:}$$

λ_k - постоянная распада нуклида (постоянная распада материнского нуклида, обеспечивающего радиоактивное равновесие цепочки нуклидов, в случае цепочки нуклидов);

T_{meas} - время измерения.

Для нуклидов входящих в цепочку распада решение не описывается выражением из элементарных функций, а является численным решением системы интегральных уравнений:

$$\bar{X}_n = \left\{ \lambda_n \cdot \sum_{k=0}^n \int_0^{T_{meas}} \frac{X_k}{\lambda_k} \cdot \prod_{i=0}^{k-1} \beta_i \cdot \lambda_i \cdot \left(\sum_{i=0}^k \frac{\exp(-\lambda_i \cdot t)}{\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^k (\lambda_j - \lambda_i)} \right) \cdot dt \right\} / T_{meas}$$

X_k - искомое решение;

λ_j - постоянная распада j -ого нуклида;

β_i - доля выбранного перехода (ветви) в данном узле дерева распада.

Оценка погрешностей

Наши предположения о характере ковариационной матрицы спектра сформулированы в разделе «Объект».

Ковариационную матрицу спектра непрерывного рассеяния также полагаем диагональной $K_{comp} = D_{comp} \cdot I$ (I - единичная матрица, D_{comp} - вектор дисперсий) причем

$D_{COMP_i} = \alpha^2 C_i^2$, C_i - число отсчётов в спектре непрерывного рассеяния. α - погрешность формирования спектра непрерывного рассеяния задаётся в параметрах поиска пиков.

Значения в каналах спектра фона полагаем коррелированными (если фон увеличился, то он увеличился, вероятно, во всех каналах). $K_{i,j} = \beta^2 B_i \cdot B_j$ для $i \neq j$, $K_{i,i} = B_i + \beta^2 B_i^2$. Такая коррелированность сохраняет свойство составной пуассоновской статистики для дисперсии $D(\sum B_i) = \sum B_i + \beta^2 (\sum B_i)^2$. Погрешностью вносимой неопределённостью спектра непрерывного рассеяния для фона пренебрегаем.

Здесь:

B_i – количество отсчётов в i – том канале спектра фона.

β – коэффициент изменчивости фона. Значение β задаётся в параметрах настройки спектрометра.

В итоге:

$$K_p^n = \max(K_p^{n-1}, (p^n - p^{n-1}) \cdot (p^n - p^{n-1})^T + (M_{ji}^n + G_0^{-1})^{-1})$$

Здесь

K_p^n, K_p^{n-1} - оценки ковариационной матрицы определяемых параметров на последнем и предпоследнем шаге процедуры решения.

$$p^n = (Z^n, w^n, A_1^n, \dots, A_N^n, a_1^n, \dots, a_N^n, b_1^n, \dots, c_N^n, c_1^n, \dots, c_N^n) \text{ и}$$

$$p^{n-1} = (Z^{n-1}, w^{n-1}, A_1^{n-1}, \dots, A_N^{n-1}, a_1^{n-1}, \dots, a_N^{n-1}, b_1^{n-1}, \dots, c_N^{n-1}, c_1^{n-1}, \dots, c_N^{n-1})$$

оценки параметров на последнем и предпоследнем шаге процедуры решения. То есть мы используем оценки погрешностей линеаризованной модели дополненной погрешностями, связанными с обрывом итерационного процесса (погрешности дрейфа спектрометра).

$$M_{ji}^n = (W \cdot \frac{dM}{dp})^T \cdot (W \cdot \frac{dM}{dp}) - \text{матрица Гаусса - Ньютона рассчитанная на последнем шаге}$$

процедуры решения. Наша процедура решения формирует ковариационную матрицу параметров в матрице обратной матрице Гаусса - Ньютона.

$W = K_S^{-1/2}$ - матрица весов. K_S - ковариационная матрица вектора $M(p) - S$. Считаем её диагональной $K_S = D_S \cdot I$ (I – единичная матрица, D_S – вектор дисперсий) причем $D_{Si} = S_i + \eta^2 \cdot S_i^2 + \alpha^2 \cdot C_i^2 + (B_i + \beta^2 \cdot B_i^2) / t^2$, где $t = t_B / t_S$ отношение времени измерения фона и пробы.

G_0 - ковариационная матрица априорных данных.

Дисперсии оценок средних за время измерения активностей:

$$\overline{Dxi} = Pres \cdot D_i / (b_i^n)^2. \text{ Здесь:}$$

$Pres$ - парциальные (рассчитанные в пределах объединения значимых областей определения коррелированных с i -м компонентом элементарных спектров) невязки для данного нуклида. Значимая область определения - область, где значения элементарного спектра отличны от нуля.

$D_i = K_p^n(i, i)$ - диагональный элемент ковариационной матрицы параметров для параметра A_i^n в режиме обработки спектров без поиска пиков и вычитания спектра непрерывного рассеяния.

$D_i = \max(H_i, K_p^n(i, i))$ - максимальное значение из порога детектирования i -го нуклида и диагонального элемента ковариационной матрицы параметров для параметра A_i^n в режиме обработки спектров с вычитанием спектра непрерывного рассеяния.

$H_i = \min(\{(h \cdot S_{compj} / ((k(Z, e_j) \cdot q_j^i \cdot Eff(e_j) \cdot T_{meas}))^2)\}_{j=1..n})$ - минимальное значение порога из значений, рассчитанных по всем n значащим линиям i -го нуклида.

h - значение порога детектирования задаваемое в параметрах настройки процедуры поиска пиков.

S_{compj} - интегральное значение спектра непрерывного рассеяния в области равной трём полуширинам пика для энергии e_j j -ой линии i -го нуклида.

q_j^i - квантовый выход j -ой линии i -го нуклида.

$Eff(e_j)$ - эффективность регистрации для энергии e_j .

b_i^n - коэффициент линейного энергетического дрейфа ($z = b \cdot x + d$) i -ой компоненты рассчитанный как коэффициент линейной регрессии оценённого нелинейного энергетического дрейфа.

Дисперсии оценок активностей на момент начала измерений для одиночных нуклидов, нуклидов равновесных цепочек и материнских нуклидов цепочек распада:

$$Dxi = \overline{Dxi} \cdot ((1 - \exp(-\lambda_i \cdot T_{meas})) / (\lambda_i \cdot T_{meas}))^2$$

λ_i - постоянная распада нуклида (постоянная распада материнского нуклида, обеспечивающего радиоактивное равновесие цепочки нуклидов, в случае цепочки нуклидов).

Дисперсии Dxi для нуклидов входящих в цепочку распада рассчитываются при решении системы интегральных уравнений описывающих распад и накопление нуклидов в процессе измерения:

$$\overline{X}_n = \left\{ \lambda_n \cdot \sum_{k=0}^n \int_0^{T_{meas}} \frac{X_k}{\lambda_k} \cdot \prod_{i=0}^{k-1} \beta_i \cdot \lambda_i \cdot \left(\sum_{i=0}^k \frac{\exp(-\lambda_i \cdot t)}{\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^k (\lambda_j - \lambda_i)} \right) \cdot dt \right\} / T_{meas}$$

Решением является линейное преобразование $x = F \cdot \overline{x}$, соответственно:

$$Kx = F \cdot K\overline{x} \cdot F^T, Dxi = Kx_{ii}$$

Итоговая полная погрешность i -ой активности:

$$G_{xi} = \sqrt{(E_0 \cdot Xi)^2 + (E_i \cdot Xi)^2 + 4 \cdot Dxi}$$

E_0 - дополнительная относительная погрешность - задается как параметр декомпозиции. E_0 связана с погрешностями определения массы пробы, нарушений геометрии и т.д. и т.п. (погрешность метода)

E_i - относительная погрешность, рассчитанных при калибровке спектрометра, значений интенсивности компонент разложения и связана с погрешностями аттестации эталонов, погрешностями расчёта элементарных спектров (погрешность средства измерения).

Оценка погрешности соответствует 95% доверительному интервалу.

Энергетическая калибровка

Энергетическая калибровка спектрометра (или выбранного спектра) определяет связь между каналами спектрометра (спектра) и энергией регистрируемого излучения. Энергетическая калибровка разделяется на два типа: **начальная** и **коррекция дрейфа**.

Для начальной калибровки используется четыре варианта функции связи $E = \varphi(Pn(z))$:

Шкала	Вид функции
Линейная	$E = Pn(z)$
Экспонента	$E = \exp(Pn(z))$
Логарифм	$E = \log(Pn(z))$
Кв. корень	$E = \sqrt{Pn(z)}$

По умолчанию используется линейная шкала $E = Pn(z)$.

$Pn(z)$ - полином рангом не выше 3-его, который на крайних калибровочных точках заменяется касательной.

$$z < z_0 \quad E = P'n(z_0) \cdot z + Pn(z_0) - P'n(z_0) \cdot z_0$$

$$z < z_0 < z_n \quad E = Pn(z)$$

$$z > z_n \quad E = P'n(z_n) \cdot z + Pn(z_n) - P'n(z_n) \cdot z_n$$

Здесь: E - энергия; $z = x - (x_0 + x_n)/2$; $x_0, (z_0 = (x_0 - x_n)/2)$ - первая калибровочная точка; $x_n, (z_n = (x_n - x_0)/2)$ - последняя калибровочная точка; $Pn(z)$ - полином; $P'n(z)$ - производная по z от полинома: $P'n(z_0)$ - производная в точке z_0 , $P'n(z_n)$ - производная в точке z_n .

Коэффициенты полинома определяются методом наименьших квадратов

$$k_{Pn} = (A^T \cdot W^T \cdot W \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot W^T \cdot W \cdot e$$

Здесь:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n P^i(z_k) \cdot P^j(z_k);$$

n - число точек для калибровки;

$P^j(z_k)$ - ортогональный полином Чебышева ранга j в точке z_k

$W = K_z^{-1/2}$ - матрица весов;

$K_z = D_z \cdot I$ (I - единичная матрица, D_z - вектор дисперсий);

K_z - ковариационная матрица положений помеченных пиков или каналов. Энергии помеченных пиков или каналов считаются известными, а вся неопределённость калибровки связана с неопределённостью положений пиков, используемых для калибровки линейчатых спектров или каналов выбранных оператором. Если для калибровки используются каналы выбранные оператором, неопределённость положения принимается равной половине канала.

e - вектор энергий используемых для калибровки пиков или каналов.

В случае если погрешность определения коэффициента при старшей степени полинома превышает его величину, ранг полинома понижается и рассчитывается новый полином энергетической калибровки.

Дрейф энергетической калибровки в процессе эксплуатации спектрометра предполагается нелинейным: $x = a \cdot ch + b + c \cdot ch^2$ (ch - канал спектрометра, $a-1$ - дрейф коэффициента усиления, b - дрейф нуля шкалы, c - коэффициент нелинейных искажений). При начальной калибровке $x = ch$.

Калибровка ширины пиков

В качестве ширины пиков используется ширина пиков на половине высоты. Калибровка ширины пиков определяет связь между шириной и энергией пиков.

Для калибровки ширины пиков используется четыре варианта функции связи $FWHM = \varphi(Pn(z))$:

Шкала	Вид функции
-------	-------------

Линейная	$FWHM = Pn(z)$
Экспонента	$FWHM = \exp(Pn(z))$
Логарифм	$FWHM = \log(Pn(z))$
Кв. корень	$FWHM = \sqrt{Pn(z)}$

По умолчанию используется $FWHM = \sqrt{Pn(z)}$.

$Pn(z)$ полином рангом не выше 3-его, который на крайних калибровочных точках заменяется касательной.

$$z < z_0 \quad FWHM = \sqrt{P'n(z_0) \cdot z + Pn(z_0) - P'n(z_0) \cdot z_0}$$

$$z < z_0 < z_n \quad FWHM = \sqrt{Pn(z)}$$

$$z > z_n \quad FWHM = \sqrt{P'n(z_n) \cdot z + Pn(z_n) - P'n(z_n) \cdot z_n}$$

Здесь: $FWHM$ - ширина пиков; x - энергия; $z = x - (x_0 + x_n)/2$; x_0 , ($z_0 = (x_0 - x_n)/2$) - первая калибровочная точка; x_n , ($z_n = (x_n - x_0)/2$) - последняя калибровочная точка; $Pn(z)$ - полином; $P'n(z)$ - производная по z от полинома: $P'n(z_0)$ - производная в точке z_0 , $P'n(z_n)$ - производная в точке z_n .

Расчёт коэффициентов полинома такой же, как и в процедуре энергетической калибровки (см. "Энергетическая калибровка").

Калибровка эффективности регистрации

В программном пакете «СПЕКТРРАД» можно рассчитать четыре функции эффективности регистрации квантов:

- эффективность регистрации квантов определённой энергии в пиках полного поглощения $Eff(e) = S(e)/Q(e)$,
- в пиках одиночного вылета $EffEsc1(e-511) = Sesc1(e-511)/Q(e)$,
- в пиках двойного вылета $EffEsc2(e-1022) = Sesc2(e-1022)/Q(e)$.
- полная эффективность регистрации квантов определённой энергии в спектре $Eff(e) = S/Q(e)$,

Здесь: e - энергия линии в кэВ, $S(e)$, $Sesc1(e-511)$, $Sesc2(e-1022)$ - соответственно: площадь пика полного поглощения, площади пиков утечки одиночного и двойного вылета, соответствующие количеству квантов излучения $Q(e)$ данной энергии.

В пакете "СПЕКТРРАД" функция эффективности регистрации задаётся в табличном виде. При малой плотности точек таблицы рекомендуется аппроксимировать таблицу сплайном (под сплайном понимается сшитый с точностью до значений функции или первых производных, в зависимости от ранга сплайна, полином). Сплайн имеет аппроксимирующий характер - он не проходит через все точки таблицы, а аппроксимирует её, формируя отрезок сплайна взвешенным методом наименьших квадратов по заданному количеству точек.

Считается, что для аппроксимации функций эффективности регистрации квантов в пиках полного поглощения в диапазоне 30-3000 кэВ, лучше других подходит двойной логарифмический масштаб полиномиальной аппроксимации $F = \exp(Pm(\log(x)))$, а для функций эффективности регистрации квантов в пиках утечки - логарифмический масштаб полиномиальной аппроксимации $F = Pm(\log(x))$.

Расчёт элементарных спектров из спектров эталонов

Полагаем, что альфа, гамма или бета спектр, накопленный спектрометром, является линейной суммой элементарных спектров:

$$s = F \cdot x + b$$

Здесь:

- F - матрица элементарных спектров нуклидов,
 x - вектор активностей нуклидов,
 b - спектр фона.

Необходимым условием расчета элементарных спектров является требование невырожденности матрицы активностей рассчитываемых элементарных спектров в рабочем наборе эталонов. Наиболее желательный вариант - ортогональность матрицы активностей.

Формула для расчета: $F = R\{(S - B) \cdot C^{-1}\}$

Здесь:

R - оператор проектирования получаемых значений на ограничения. В данном случае используется обнуление значений меньших заданного статистического уровня ($<G$) для задания области значений элементарного спектра.

C^{-1} - матрица обратная матрице средних за время измерения активностей нуклидов в эталонах:

$$C_{nm} = A_{nm} \left\{ \sum_{k=0}^l \lambda_k \int_{T_m}^{T_e} \left(\frac{X_k}{\lambda_k} \cdot \prod_{i=0}^{k-1} \beta_i \cdot \lambda_i \cdot \left(\sum_{i=0}^k \frac{\exp(-\lambda_i \cdot (t - T_p))}{\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^k (\lambda_j - \lambda_i)} \right) \right) dt \right\} / (T_E - T_M)$$

A_{nm} - активность n -ого нуклида в m -том эталоне на дату аттестации; n -ый нуклид в матрице активностей является l -ым нуклидом в цепочке распада нуклидов содержащихся в m -ом эталоне;

λ_j - постоянная распада j -ого нуклида в цепочке распада;

β_i - доля выбранного перехода (ветви) в данном узле дерева распада.

T_p - дата аттестации эталона;

T_M - дата начала измерений эталона;

T_E - дата окончания измерений.

S - матрица спектров измеренных эталонов нормированных на живое время измерения.

B - матрица спектров фона нормированных на живое время измерения.

Расчёт погрешностей элементарных спектров основан на условии, что статистические флуктуации спектра пренебрежимо малы в сравнении с погрешностью аттестации эталонов (спектры эталонов должны быть измерены с хорошей статистикой), и, соответственно, относительная погрешность значений в каналах спектров эталонов равна относительной погрешности аттестации эталонов. Соответственно

$$D_{Aij} = \sum_k D((S - B)_{ik}) \cdot (X_{kj}^{-1})^2.$$

D_{Aij} - дисперсия i -ого канала j -ого элементарного спектра.

$D((S - B)_{ik})$ - дисперсия k -ого элемента i -ой строки матрицы $(S - B)$.

Расчёт моделей пиков и линий

Аппаратурный спектр, зарегистрированный спектрометром, описывается выражением

$$S(x) = \int F(x, e) \cdot s(e) \cdot de$$

Здесь:

$F(x, e)$ - функция, описывающая процесс регистрации квантов излучения $s(e)$ в виде аппаратурного спектра $s(x)$ - ядро преобразования.

В случае линейчатого спектра $s(e) = A_i \cdot \delta(e - e_i)$, δ - дельта функция Дирака.

$$S(x) = \sum A_i \cdot F(x, e_i),$$

где $F(x, e_i)$ - сечения ядра преобразования для заданной энергии e_i , или, другими словами, - отклик спектрометра на излучение заданной энергии - спектр линии.

Если мы сможем рассчитать какое-то количество таких сечений ядра преобразования (спектров линий), то сможем интерполяцией по этим сечениям рассчитывать аппаратные спектры нуклидов.

Исходя из предположения непрерывности $F(x, e)$, предлагается следующая параметризация:

Для линейчатых спектров с высоким разрешением – расчёт моделей пиков.

Под спектром понимается спектр пиков (спектр с предварительно вычтенным спектром непрерывного рассеяния). Под откликом спектрометра понимается пик единичной площади заданной энергии и ширины

$$F(x, e) = \text{Eff}(e) \cdot F((x - En^{-1}(e) + En^{-1}(e_i)) / (W(e) / W(e_i)))$$

Здесь:

$\text{Eff}(e)$ - функция эффективности регистрации,

$En(e)$ - энергетическая калибровка спектрометра,

$W(e)$ - калибровка ширины пиков,

e_i - энергия линии.

Используется энергетическая калибровка спектрометра, калибровка ширины пиков и калибровка эффективности регистрации.

Для линейчатых спектров с плохим разрешением – расчёт моделей линий.

Спектр включает и спектр непрерывного рассеяния. Сечение ядра преобразования - полный отклик спектрометра на один квант излучения заданной энергии (сечение включает и эффективность регистрации).

$$F(x, e) = F(e \cdot (x - En^{-1}(e) + En^{-1}(e_i)) / e_i)$$

Используется только энергетическая калибровка спектрометра.

Для линейчатых хорошо разрешённых спектров модель пика рассчитывается по спектрам пиков полного поглощения. При этом предполагается (и подтверждается опытом), что в пределах используемого для расчёта модели пика или мультиплета все изменения формы достаточно точно описываются деформацией аффинного типа $\varphi(z) = \varphi\left(\frac{x-p}{w}\right)$.

Спектр пика $\varphi(i)$ при таком предположении рассчитывается решением системы

$$\text{интегральных уравнений } B(i) = \int_i^{i+1} \sum_{j=1}^n \varphi\left(\frac{i-p(e_j)}{w(e_j)}\right) \cdot di.$$

Здесь: $B(i) = S(i) - S_{\text{comp}}(i) - Bgd(i) + Bgd_{\text{comp}}(i)$

$S(i)$ - спектр эталона, $S_{\text{comp}}(i)$ - спектр непрерывного рассеяния спектра эталона,

$Bgd(i)$ - спектр фона приведённый к времени измерения спектра эталона,

$Bgd_{\text{comp}}(i)$ - спектр комптоновского рассеяния для фона,

$p(e_j)$ - положение j -ой линии с энергией e на шкале каналов,

$w(e_j)$ - ширина j -ой линии с энергией e .

Процедура рассчитывает искомую функцию для всей области используемого одиночного пика или мультиплета, определяет параметры пика (энергия, ширина, площадь), нормирует выбранные пики на площадь и сохраняет их как модели пиков.

Для плохо разрешенных спектров (обработка без выделения пиков) спектры линий рассчитываются из элементарных спектров. При этом может быть, что весь набор элементарных спектров не содержит спектров из одной линии (из набора нуклидов, обычно

используемых для калибровки сцинтилляционных гамма спектрометров, только элементарный спектр К-40 состоит в основном из одной линии 1460.8 кэВ). Поэтому процедура расчёта использует описанную параметризацию пиков и для расчёта линий. Предположим, элементарный спектр содержит n линий и нет ни одной рассчитанной линии. Оператор должен выбрать наиболее мощную линию в качестве рассчитываемой (линия с индексом 0), при этом все остальные линии программа выражает, пользуясь описанной параметризацией, экстраполяцией рассчитываемого спектра линии. Если элементарный спектр s содержит k каналов, мы получаем систему из k уравнений с k неизвестными

$$F(e_i \cdot (x - En^{-1}(e_i) + En^{-1}(e_i)) / e_0) = s$$

Поскольку все дополнительные линии получаются экстраполяцией основной, решение будет приемлемым при выполнении условий:

- дополнительные линии расположены вблизи основной линии,
- вклад дополнительных линий незначителен в сравнении с вкладом основной линии.

Если рассчитываются несколько линий из нескольких элементарных спектров, процедура вначале рассчитывает наиболее обусловленные линии и использует полученные спектры для интерполяции линий рассчитываемых позже.

Расчёт элементарных спектров по таблице линий

В том случае, если необходимый для декомпозиции измеренного спектра элементарный спектр не найден в наборе рассчитанных из спектров эталонов элементарных спектров, он рассчитывается процедурой расчёта элементарных спектров по таблице сформированных откликов спектрометра на излучение определённых энергий (спектров линий или спектров пиков), функциям калибровок спектрометра и библиотеке нуклидов (для краткости и отличия от других методов расчёта - процедурой "**генерации**").

Процедура использует метод кусочно-линейной интерполяции (экстраполяции) спектров линий, формирующих элементарный спектр, по двум ближайшим к энергии рассчитываемой линии предварительно сформированных спектров линий (см. "Расчёт спектров линий") определённых энергий e_1 и e_2 в заданном оператором режиме интерполяции:

$$f = a \cdot x + b$$

$$f = \exp(a \cdot x + b)$$

$$f = a \cdot \log(x) + b$$

$$f = \exp(a \cdot \log(x) + b)$$

Отклик на излучение определенной энергии e рассчитывается интерполяцией (экстраполяцией):

$$f(e, i) = ((e_2 - e) \cdot f(e_1, k_1, i) + (e_1 - e) \cdot f(e_2, k_2, i)) / (e_2 - e_1), \dots k_1 = e / e_1, k_2 = e / e_2$$

Спектр нуклида $F = \sum A_j \cdot f_j$ - сумма откликов с соответствующим квантовым выходом A_j всех линий данного нуклида.

Для расчёта спектров линий заданной энергии e используется следующая параметризация рассчитанных спектров линий

Для линейчатых спектров с высоким разрешением – расчёт спектра пиков.

Под спектром понимается спектр пиков (спектр с предварительно вычтенным спектром непрерывного рассеяния). Под спектром линии понимается пик единичной площади заданной энергии и ширины

$$F(e, x) = Eff(e) \cdot F(e_i, (x - En^{-1}(e) + En^{-1}(e_i)) / (W(e) / W(e_i)))$$

Здесь:

$Eff(e)$ - функция эффективности регистрации,

$En(e)$ - энергетическая калибровка спектрометра,

$W(e)$ - калибровка ширины пиков,
 e_i - энергия линии.

Используется энергетическая калибровка спектрометра, калибровка ширины пиков и калибровка эффективности регистрации.

Для линейчатых спектров с плохим разрешением – расчёт полных спектров..

Спектр включает и спектр непрерывного рассеяния.

$$F(e, x) = F(e_i, (x - En^{-1}(e) + En^{-1}(e_i)) / e_i)$$

Используется только энергетическая калибровка спектрометра.

Интерполяция спектров компонент

Спектры компонент разложения рассчитываются из элементарных спектров в соответствии с заданным геометрическим параметром пробы (как правило - заданной плотностью пробы). Расчет осуществляется процедурой кусочно-полиномиальной интерполяции (экстраполяции) для каждого канала спектра по n ($n < 7$) элементарным спектрам с различными геометрическими параметрами по выбранной формуле:

$$F(S) = F([EXP](Pm[LOG](X)))$$

с параметрами *Parameter*, *Rang*, *Mode*, *Points* и *Volume* устанавливаемыми в файле "decomp.ini".

Здесь:

- F(S)* Функция интерполируемых значений:
 (S - значения аппроксимируемых точек спектра).
- X* Параметр интерполяции (плотность пробы или один из размеров пробы или изменяемых размеров геометрии).
- Pm* Полином ранга *Rang*. Значение по умолчанию - *Rang* = 1.
Rang должен лежать в диапазоне от 0 до 3.
- Mode* Вид интерполяции:
 mode=0 – $F = Pm(x)$,
 mode=1 – $F = Pm(\log(x))$,
 mode=2 – $F = \exp(Pm(x))$ – значение по умолчанию для гамма спектрометров,
 mode=3 – $F = \exp(Pm(\log(x)))$,
 mode=4 – $F = 1/Pm(x)$,
 mode=5 – $F = 1/Pm(\log(x))$,
 mode=6 – $F = 1/\exp(Pm(x))$,
 mode=7 – $F = 1/\exp(Pm(\log(x)))$,
 mode=8 – $F = F_0 \cdot (1 - \exp(-k \cdot x))$ - значение по умолчанию для геометрий «толстого слоя»,
 mode=9 – $F = F_0 \cdot (1 - \exp(-k \cdot x)) / (k \cdot x)$ - значение по умолчанию для альфа и бета спектрометров,
- Points* Число точек, участвующих в формировании полинома.
- Volume* Объём стандартного для данной геометрии сосуда для измерения проб.

Поиск пиков

Процедура поиска пиков использует по выбору оператора три метода поиска пиков: "Плавающий отрезок".

$$f(i) = \left(\int_{i-w(i)/2}^{i+w(i)/2} (Sp(x) - Sbgd(x)) \cdot dx \right) / \sqrt{1 + \int_{i-w(i)/2}^{i+w(i)/2} Sp(x) \cdot dx}$$

Здесь:

$f(i)$ - функция детектирования.

i - канал спектра, $w(i)$ - ширина пика (в каналах).

Sp - спектр, $Sbgd$ - значения "фона" под пиком, аппроксимируемые отрезком прямой закреплённых на спектре в точках $i-w(i)/2$ и $i+w(i)/2$.

Свёртка с моделью пика.

$$f(e) = \left(\int_{e-w(e)/2}^{e+w(e)/2} F(x, e) \cdot (Sp(x) - Sbgd(x)) \cdot dx \right) / \int_{e-w(e)/2}^{e+w(e)/2} \sqrt{Sp(x) \cdot F(x, e)^2} \cdot dx$$

Здесь:

$f(e)$ - функция детектирования.

e - энергия, $w(e)$ - ширина пика (в единицах энергии).

$F(x, e)$ - модель линии (пика).

Метод Марискотти.

$$f(e) = \left(\int_{e-2w(e)}^{e+2w(e)} M(x, e) \cdot Sp(x) \cdot dx \right) / \int_{e-2w(e)}^{e+2w(e)} \sqrt{Sp(x) \cdot M(x, e)^2} \cdot dx$$

Здесь:

$f(e)$ - функция детектирования.

e - энергия, $w(e)$ - ширина пика (в единицах энергии).

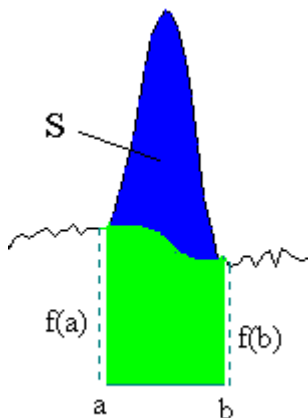
$M(x, e)$ - функция Марискотти.

Считается, что в спектре присутствует пик, если значение функции детектирования превышает порог, заданный параметрах настройки.

Аппроксимация спектра непрерывного рассеяния

Для аппроксимации спектра непрерывного рассеяния под пиком используется два метода:

Интегральная ступенька Филиппота.



$$f_j(i) = f(a) - (s(i) - f_{j-i}(i)) \cdot (f(a) - f(b)) / S_{j-1}$$

Здесь:

f - спектр непрерывного рассеяния, i - канал спектра, j - номер итерации.

s - спектр; a, b - начало и конец области пика.

$$S = \sum_a^b (s(i) - b(i)) - \text{площадь пика.}$$

Полином. При аппроксимации полиномом участок спектра, содержащий пики раскладывается методом наименьших квадратов на сумму спектров пиков и полином спектра

непрерывного рассеяния.

Учёт каскадных переходов

Для линейчатых гамма спектров эффекты, связанные с каскадными переходами (утечка импульсов из пиков полного поглощения в пики суммирования каскадных переходов), учитываются как при обработке спектров с поиском пиков (калибровка эффективности, генерация спектров, расчёт активностей нуклидов), так и при обработке спектров без поиска пиков (генерация спектров, расчёт активностей нуклидов).

Для двух каскадных переходов:

$N_1 = Ef_1 \cdot Q_1 - N_1^*$ - вероятность регистрации импульсов регистрируемых в первом пике с учётом утечки.

$N_2 = Ef_2 \cdot Q_2 - N_2^*$ - вероятность регистрации импульсов регистрируемых во втором пике с учётом утечки.

$N_{12} = Ef_1 \cdot K_1 \cdot Q_1 \cdot Ef_2 \cdot K_2 \cdot Q_{2/1}$ - вероятность регистрации импульсов регистрируемых в пике суммирования.

$N_1^* = Ef_1 \cdot K_1 \cdot Q_1 \cdot Ef_2^* \cdot K_2 \cdot Q_{2/1}$ - вероятность утечки импульсов из первого пика.

$N_2^* = Ef_2 \cdot K_2 \cdot Q_2 \cdot Ef_1^* \cdot K_1 \cdot Q_{1/2}$ - вероятность утечки импульсов из второго пика.

Q_1 - вероятность выхода квантов для первой каскадной линии.

Q_2 - вероятность выхода квантов для второй каскадной линии.

$Ef_1 = \iiint f(e_1) \cdot dv / Vol$ - усреднённая по объёму пробы эффективность регистрации в пике полного поглощения для первой каскадной линии. Здесь: $f(e)$ - эффективность регистрации кванта с энергией e для данной точки геометрии, Vol - объём пробы.

Ef_2 - усреднённая по объёму пробы эффективность регистрации в пике полного поглощения для второй каскадной линии.

Ef_1^* - усреднённая по объёму пробы полная эффективность регистрации для первой каскадной линии (вероятность регистрации кванта в любой области спектра: пике полного поглощения, спектре комптоновского рассеяния, пиках утечки, аннигиляционном пике).

Ef_2^* - усреднённая по объёму пробы полная эффективность регистрации для второй каскадной линии.

$K(e) = \sqrt{(\iiint f(e) \cdot f(e) \cdot dv) / (\iiint f(e) \cdot dv \cdot \iiint f(e) \cdot dv)}$ - геометрический фактор учитывающий отличие эффективности регистрации в данной точке от эффективности регистрации усреднённой по объёму.

$Q_{2/1}$ - вероятность выхода кванта второй каскадной линии при условии выхода кванта для первой.

$Q_{1/2}$ - вероятность выхода кванта первой линии при условии выхода кванта для второй.

При расчёте используется равенство $Q_2 \cdot Q_{1/2} = Q_1 \cdot Q_{2/1}$. - вероятность одновременного выхода двух гамма квантов.

Для трёх каскадных переходов:

$N_1 = Ef_1 \cdot Q_1 \cdot (1 - Ef_2^* \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot Q_{2/1}) \cdot (1 - Ef_3^* \cdot K_1 \cdot K_3 \cdot Q_{3/1})$ - вероятность регистрации импульсов регистрируемых в пике полного поглощения с учётом утечки (аналогично для N_2 и N_3).

$N_{12} = Ef_1 \cdot K_1 \cdot Q_1 \cdot Ef_2 \cdot K_2 \cdot Q_{2/1} \cdot (1 - Ef_3^* \cdot K_3 \cdot Q_{3/1})$ - вероятность регистрации импульсов регистрируемых в пике суммирования двух каскадных (аналогично для N_{13} и N_{23}).

$N_{123} = Ef_1 \cdot K_1 \cdot Q_1 \cdot Ef_2 \cdot K_2 \cdot Q_{2/1} \cdot Ef_3 \cdot K_3 \cdot Q_{3/1}$ - вероятность регистрации импульсов регистрируемых в пике суммирования трёх каскадных.

$Q_{3/1}$ - вероятность выхода квантов третьей каскадной линии при условии выхода квантов для первой.

Ef_3 - эффективность регистрации в пике полного поглощения для третьей каскадной линии.

Ef_3^* - полная эффективность регистрации для третьей каскадной линии.

Приложение 2

Некоторые стандартные шаблоны обработки альфа спектров

1. "Уран"

Область применения: измерение значений активности радионуклидов ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U в счетном образце и расчет параметра соответствия санитарным нормам - "В". Счетный образец готовится методом электролитического осаждения на металлическую подложку урана из химически выделенных солей урана.

Геометрия измерений: счетный образец представляет собой металлический диск с фиксированным диаметром пятна осаждаемого материала.

Предполагаемый состав альфа-излучающих радионуклидов в счетном образце: ^{232}U , ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U .

Сведения о счетном образце, используемые программой:

- количество пробы, отобранной на анализ (m_0);
- масса полученного концентрата (m_1);
- масса счетного образца (m_2);
- активность трассера (U-232)/

Энергетический интервал: 2000 - 7000 кэВ.

Шаблон декомпозиции: Уран

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Основные:	Дополнительные:	Включенные в отчет:
	<input type="checkbox"/> Tl-207 <input type="checkbox"/> Tl-208 <input type="checkbox"/> Tl-209 <input type="checkbox"/> Tl-210 <input type="checkbox"/> U-230 <input checked="" type="checkbox"/> U-232 <input type="checkbox"/> U-233 <input checked="" type="checkbox"/> U-234 <input checked="" type="checkbox"/> U-235 <input type="checkbox"/> U-236 <input checked="" type="checkbox"/> U-238 <input type="checkbox"/> U-240 <input type="checkbox"/> U-nat	<input checked="" type="checkbox"/> U-232 <input checked="" type="checkbox"/> U-234 <input checked="" type="checkbox"/> U-235 <input checked="" type="checkbox"/> U-238

Включить компоненты рентгеновской флуоресценции

Вычислить суммарную активность по нуклиду Учитывать энергию излучения

Шаблон декомпозиции: Уран

Компоненты: **Параметры 1** | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Общие параметры

Границы обработки, кэВ: 2000 - 7000 []

Допустимая невязка: 2

Допустимый энергетический дрейф (%): 10 / 100 (текущий/общий)

Допустимый дрейф разрешения (%): 100

Дополнительная погрешность (%): 7

Корректировать энергетическую калибровку спектра по результатам обработки

Глобальный поиск решения

Варьирование усиления Варьирование нуля шкалы Варьирование разрешения

Диапазон: 3 % Диапазон: 1 % Диапазон: 150 %

Число точек: 11 Число точек: 20 Число точек: 11

Варьирование Z эффективное пробы Варьирование толщины пробы

Уточнение решения методом Гаусса-Ньютона

Дрейф коэффициента усиления Дрейф нуля энергетической шкалы

Дрейф разрешения спектрометра Независимый дрейф компонент

Учёт нелинейных искажений дрейфа энергетической калибровки

Число итераций: 100

Коэффициент демпфирования: 8 %

Сохранить Отмена Справка

Для поиска начального приближения к уточнению решения методом Гаусса-Ньютона используется варьирование коэффициента усиления и варьирование разрешения спектрометра, а варьирование нуля шкалы отключено поскольку, как показал опыт эксплуатации, дрейфует в большей степени именно коэффициент усиления и разрешение альфа спектрометров. При использовании современных компьютеров с большим быстродействием можно включить и варьирование нуля шкалы. Диапазон изменения коэффициента усиления, разрешения и нуля шкалы спектрометра определяется в процессе его эксплуатации.

Шаблон декомпозиции: Уран

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Командный файл предварительной обработки

Режим обработки

Предварительно вычесть спектр непрерывного рассеяния

Вычесть фон Использовать фон из архива измерений

Оконный метод обработки Использовать спектры пиков как компоненты

В спектре присутствуют неучтенные компоненты Длина отрезка сплайна 3 ПШПВ

Допустимы отрицательные значения активностей Ранг сплайна 0

Помехоустойчивое оценивание. Один сплайн на весь диапазон

Границы МНК оценивания 2 ср.кв.откл. Игнорировать пики с погрешностями более 2000 %

Дополнительные параметры

Подставлять в качестве границ помеченные маркером каналы

Дополнить список компонент компонентами, имеющими линии вблизи маркера

Автоматический анализ состава

без участия оператора

Требуемый уровень коэффициента корреляции для включения компоненты (более) 0 %

Библиотека нуклидов Nuclides\CalibAlpha.ncl

Сохранить Отмена Справка

На завершающем этапе оценки активностей, после коррекции дрейфа, используется оконный метод обработки, поскольку он менее чувствителен к изменениям формы линий.

Априорные данные в данном шаблоне обработки не используются.

В дальнейшем при описании шаблонов обработки мы будем приводить примеры только тех страниц формы, которые содержат полезную информацию.

Шаблон декомпозиции: Уран

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

№№	Левая граница (кэВ)	Правая граница (кэВ)
1	3760	4194
2	4194.10009765625	4432
3	4432.10009765625	4860
4	4860.10009765625	5500
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		

Ширина окна для линии (в полуширинах пиков)

Подставить в качестве границ энергетических окон границы значимых линий нуклидов ?

Да

Подставить в качестве границ энергетических окон помеченные маркером каналы спектра ?

Да

Сохранить Отмена Справка

Границы используемых энергетических окон.

Форма и содержание отчёта определяются предпочтениями оператора:

Шаблон декомпозиции: Уран

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Параметры отчёта | Содержание

- Форматирование текста таблицей
- Нормировать на величину пробы
- Учитывать распад нуклидов
- Учитывать коэффициент неравновесности
- Пересчитать результаты на дату отбора пробы
- Использовать при пересчёте период полураспада материнского нуклида
- Пересчитать результаты на коэффициент концентрирования
- Рассчитать эфф. активность по сумме нормированных активностей нуклидов
- Рассчитать эфф. активность по мощности излучения
- Заменять отрицательные значения активностей нулевыми
- Приводить верхнюю границу $\max(\text{МДА или Акт} + \text{Погр})$ для активностей меньше МДА
- Не включать в отчёт нуклиды с активностями меньше погрешностей

В качестве погрешности величин приводить

- Полную погрешность
- Случайную составляющую погрешности

Округлить результаты при выводе в отчёт до 100 % от погрешности

Округлять переменные калькулятора

Точность представления результатов Авт. цифр

Единица измерения активности Бк Единица измерения мощности мкВт

Шаблон отчета

Включить Обзор...

Вывести отчёт на экран Сохранить отчёт в архиве

Сохранить Отмена Справка

Округление результатов до 100% от погрешности соответствует действующим требованиям к представлению результатов измерений.

Шаблон декомпозиции: Уран

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Параметры отчёта | Содержание

<input checked="" type="checkbox"/> Версия программы	<input checked="" type="checkbox"/> Невязка
<input checked="" type="checkbox"/> Спектрометр	<input checked="" type="checkbox"/> Калькулятор
<input checked="" type="checkbox"/> Геометрия	<input checked="" type="checkbox"/> Энергетический диапазон, дрейф
<input checked="" type="checkbox"/> Дополнительные сведения	<input checked="" type="checkbox"/> Данные приведены на дату
<input checked="" type="checkbox"/> Код пробы	<input checked="" type="checkbox"/> Предупреждения
<input checked="" type="checkbox"/> Наименование пробы	<input checked="" type="checkbox"/> Число счётных образцов
<input checked="" type="checkbox"/> Оператор	
<input checked="" type="checkbox"/> Тип пробы	
<input type="checkbox"/> -	
<input type="checkbox"/> -	
<input checked="" type="checkbox"/> Заявитель	
<input checked="" type="checkbox"/> Место отбора	
<input type="checkbox"/> -	
<input checked="" type="checkbox"/> Активность трассера (Бк)	
<input type="checkbox"/> -	
<input checked="" type="checkbox"/> Количество пробы	
<input type="checkbox"/> -	
<input type="checkbox"/> -	
<input type="checkbox"/> -	
<input checked="" type="checkbox"/> Дата отбора	
<input checked="" type="checkbox"/> Дата измерения	
<input checked="" type="checkbox"/> Время измерения	
<input checked="" type="checkbox"/> Таблица активностей нуклидов	
<input type="checkbox"/> Столбец "Интенсивность\Невязка"	
<input type="checkbox"/> Столбец "Погрешность (%)"	
<input type="checkbox"/> Столбец "Нормативы"	
<input type="checkbox"/> Суммарная интенсивность	
<input checked="" type="checkbox"/> Интенсивность модели	
<input type="checkbox"/> Мощность излучения	

Вывести отчёт на экран Сохранить отчёт в архиве

Сохранить Отмена Справка

Шаблон декомпозиции: Уран

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Программа вычислений

```

p,B;dB;d;e;a;a1,e1,e2;d1;d2;k;ActTr;ActTr0;ErrTr;
{
  ActTr0=Size;
  if (ActTr0 <= 0)
    ActTr0=input("Активность трассера (Бк)");
  ActTr = Act(U-232); ErrTr = Err(U-232);
  if (ActTr > 0 & ActTr0 > 0)
  {
    k = ActTr0 / (SampleValue*ActTr); // коэффициент выхода
    a = Act(U-234)*k;
    if (a < 0) a = 0;
    e1 = Err(U-234)*k;
    d1 = e1*e1;
    e2 = ErrTr*k*Act(U-234)/Act(U-232);
    d2 = e2*e2;
    d = d1+d2; e = sqrt(d);
    e1 = VRound*e;
    ErCalc4 = fround(e, e1); // U-234
    Calc4 = fround(a, e1);
    p = Norm1(U-234);
    B = 0; dB = 0;
    if (p > 0)
    { B = a/p; dB = d/(p*p);}
    a = Act(U-235)*k;
    if (a < 0) a = 0;
    e1 = Err(U-235)*k;
    d1 = e1*e1;
    e2 = ErrTr*k*Act(U-235)/Act(U-232);
    d2 = e2*e2; d = d1+d2; e = sqrt(d);
    e1 = VRound*e;
    ErCalc5 = fround(e, e1); // U-235
    Calc5 = fround(a, e1);
    p = Norm1(U-235);
    if (p > 0)
    { B = B+a/p; dB = dB+d/(p*p);}
    a = Act(U-238)*k;
    if (a < 0) a = 0;
    e1 = Err(U-238)*k;
    d1 = e1*e1;
    e2 = ErrTr*k*Act(U-238)/Act(U-232);
    d2 = e2*e2;
    d = d1+d2;
    e = sqrt(d);
    e1 = VRound*e;
    ErCalc6 = fround(e, e1); // U-238
    Calc6 = fround(a, e1);
    p = Norm1(U-238);
    if (p > 0)
    { B = B+a/p; dB = dB+d/(p*p);}
    ActTr = ActTr*k;
    ErrTr = ErrTr*k;
    dB=sqrt(dB);
    e1 = VRound*dB;
    ErCalc1 = fround(dB, e1);
    Calc1 = fround(B, e1);
    Calc2=Calc1+ErCalc1;
    Calc3=Calc1-ErCalc1;
  }
  else
    ignoreCalc();
}

```

Формат вывода результатов в отчете

Акт. U-232	%s +/- %s Бк/л
Акт. U-234	%s +/- %s Бк/л
Акт. U-235	%s +/- %s Бк/л
Акт. U-238	%s +/- %s Бк/л

Параметр соответствия (B=Акт./Контр.Уровень)

B+dB = %s(B) + %s(dB) = %s

B-dB = %s(B) - %s(dB) = %s

Список переменных для печати в отчете :

ActTr, ErrTr, Calc4, ErCalc4, Calc5, ErCalc5, Calc6, ErCalc6, Calc1, ErCalc1, Calc2, Calc1, ErCalc1,

Сохранить | Отмена | Справка

Программа калькулятора рассчитывает активности определяемых нуклидов урана через известную активность внесённого трассера. В качестве трассера используется U-232.

2. "Плутоний"

Область применения: измерение значений активности радионуклидов ^{238}Pu , ^{240}Pu и ^{242}Pu в счетном образце.

Геометрия измерений: счетный образец представляет собой металлический диск с фиксированным диаметром пятна осаждённого материала.

Предполагаемый состав альфа-излучающих радионуклидов в счетном образце: ^{238}Pu , ^{240}Pu и ^{242}Pu .

Энергетический интервал: 1000 - 7000 кэВ.

Шаблон декомпозиции: Плутоний

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Основные:	Дополнительные:	Включенные в отчет:
	<input type="checkbox"/> Pu-239	<input checked="" type="checkbox"/> Pu-238
	<input checked="" type="checkbox"/> Pu-240	<input checked="" type="checkbox"/> Pu-240
	<input checked="" type="checkbox"/> Pu-242	<input checked="" type="checkbox"/> Pu-242
	<input type="checkbox"/> Pu-244	
	<input type="checkbox"/> Ra-223	
	<input type="checkbox"/> Ra-224	
	<input type="checkbox"/> Ra-225	
	<input type="checkbox"/> Ra-226	
	<input type="checkbox"/> Ra-228	
	<input type="checkbox"/> Rn-218	
	<input type="checkbox"/> Rn-219	
	<input type="checkbox"/> Rn-220	
	<input type="checkbox"/> Rn-222	
	<input type="checkbox"/> Th-227	
	<input type="checkbox"/> Th-228	
	<input type="checkbox"/> Th-229	
	<input type="checkbox"/> Th-230	
	<input type="checkbox"/> Th-231	
	<input type="checkbox"/> Th-232	
	<input type="checkbox"/> Th-234	

Включить компоненты рентгеновской флуоресценции

Вычислить суммарную активность по нуклиду Учитывать энергию излучения

Шаблон декомпозиции: Плутоний

Компоненты | **Параметры 1** | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Общие параметры

Границы обработки, кэВ: 1000 - 7000 []

Допустимая невязка: 2

Допустимый энергетический дрейф (%): 10 / 100 (текущий/общий)

Допустимый дрейф разрешения (%): 100

Дополнительная погрешность (%): 7

Корректировать энергетическую калибровку спектра по результатам обработки

Глобальный поиск решения

Варьирование усиления Варьирование нуля шкалы Варьирование разрешения

Диапазон: 2 % Диапазон: 1 % Диапазон: 0 %

Число точек: 50 Число точек: 20 Число точек: 3

Варьирование Z эффективное пробы Варьирование толщины пробы

Уточнение решения методом Гаусса-Ньютона

Дрейф коэффициента усиления Дрейф нуля энергетической шкалы

Дрейф разрешения спектрометра Независимый дрейф компонент

Учёт нелинейных искажений дрейфа энергетической калибровки

Число итераций: 100

Коэффициент демпфирования: 8 %

Сохранить Отмена Справка

Шаблон декомпозиции: Плутоний

Компоненты | Параметры 1 | **Параметры 2** | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Командный файл предварительной обработки

Режим обработки

Предварительно вычесть спектр непрерывного рассеяния

Вычесть фон Использовать фон из архива измерений

Оконный метод обработки Использовать спектры пиков как компоненты

В спектре присутствуют неучтенные компоненты Длина отрезка сплайна ПШПВ

Допустимы отрицательные значения активностей Ранг сплайна

Помехоустойчивое оценивание. Один сплайн на весь диапазон

Границы МНК оценивания ср.кв.откл. Игнорировать пики с погрешностями более %

Дополнительные параметры

Подставлять в качестве границ помеченные маркером каналы

Дополнить список компонент компонентами, имеющими линии вблизи маркера

Автоматический анализ состава

без участия оператора

Требуемый уровень коэффициента корреляции для включения компоненты (более) %

Библиотека нуклидов Обзор...

Сохранить Отмена Справка

Шаблон «Плутоний» используется для поверки альфа спектрометра, поэтому в нём отсутствует расчёт выхода по трассеру.

Пользователь программного пакета «СПЕКТРАД» должен сам создать необходимые шаблоны обработки альфа спектров в соответствии с требуемой задачей, пользуясь описанием программного пакета «СПЕКТРАД» и приведёнными примерами шаблонов обработки.

Некоторые стандартные шаблоны обработки бета спектров

1. "Sr-90"

Область применения: измерение значений активности радионуклидов ^{90}Sr , ^{90}Y и ^{40}K в счетном образце. Счетный образец может быть приготовлен как из нативного материала, так и с применением методов физического концентрирования (озоление, выпаривание, высушивание и т.п.).

Геометрия измерений: счетный образец представляет собой таблетку равной толщины диаметра стандартной измерительной кюветы ($\varnothing 70\text{мм}$).

Предполагаемый состав бета-излучающих радионуклидов в счетном образце: ^{90}Sr в состоянии радиоактивного равновесия с ^{90}Y , ^{137}Cs , ^{40}K .

Сведения о счетном образце, используемые программой:

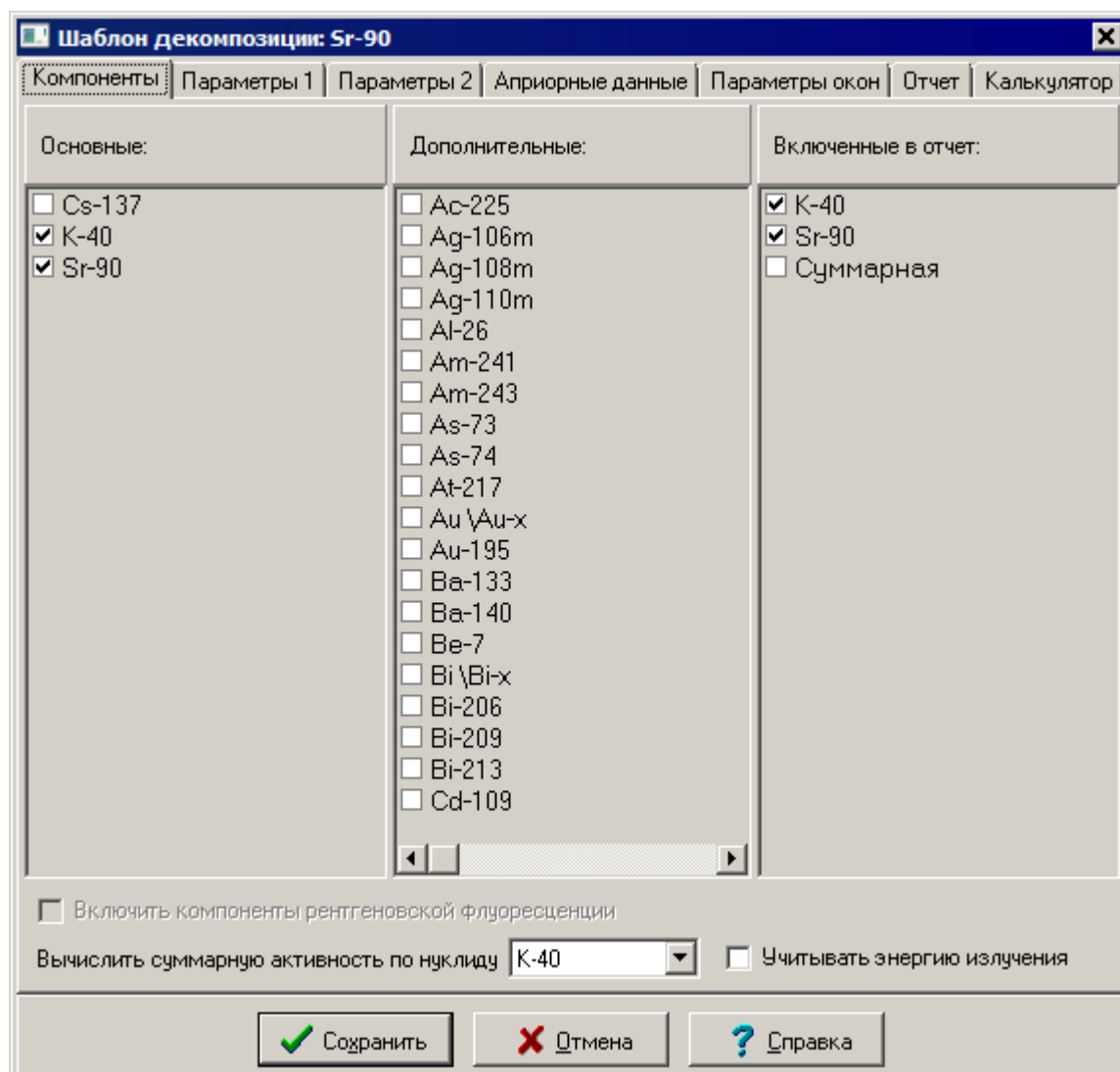
- количество пробы, отобранной на анализ (m_0);
- масса полученного концентрата (m_1);
- масса счетного образца (m_2).

Формула для расчета удельной активности исходной пробы:

$$A = A_m \cdot m_1 / m_0$$

Здесь: A - удельная активность исходной пробы (Бк/кг или Бк/л); A_m - удельная активность счетного образца (Бк/кг).

Энергетический интервал: 800 - 3000 кэВ.



Шаблон декомпозиции: Sr-90

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Основные:	Дополнительные:	Включенные в отчет:
<input type="checkbox"/> Cs-137	<input type="checkbox"/> Ac-225	<input checked="" type="checkbox"/> K-40
<input checked="" type="checkbox"/> K-40	<input type="checkbox"/> Ag-106m	<input checked="" type="checkbox"/> Sr-90
<input checked="" type="checkbox"/> Sr-90	<input type="checkbox"/> Ag-108m	<input type="checkbox"/> Суммарная
	<input type="checkbox"/> Ag-110m	
	<input type="checkbox"/> Al-26	
	<input type="checkbox"/> Am-241	
	<input type="checkbox"/> Am-243	
	<input type="checkbox"/> As-73	
	<input type="checkbox"/> As-74	
	<input type="checkbox"/> At-217	
	<input type="checkbox"/> Au \Au-x	
	<input type="checkbox"/> Au-195	
	<input type="checkbox"/> Ba-133	
	<input type="checkbox"/> Ba-140	
	<input type="checkbox"/> Be-7	
	<input type="checkbox"/> Bi \Bi-x	
	<input type="checkbox"/> Bi-206	
	<input type="checkbox"/> Bi-209	
	<input type="checkbox"/> Bi-213	
	<input type="checkbox"/> Cd-109	

Включить компоненты рентгеновской флуоресценции

Вычислить суммарную активность по нуклиду: K-40 Учитывать энергию излучения

Сохранить | Отмена | Справка

Шаблон декомпозиции: Sr-90

Компоненты: **Параметры 1** | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Общие параметры

Границы обработки, кэВ: 800 - 3000 []

Допустимая невязка: 2

Допустимый энергетический дрейф (%): 5 / 100 (текущий/общий)

Допустимый дрейф разрешения (%): 100

Дополнительная погрешность (%): 5

Корректировать энергетическую калибровку спектра по результатам обработки

Глобальный поиск решения

Варьирование усиления Варьирование нуля шкалы Варьирование разрешения

Диапазон: 0 % Диапазон: 0 % Диапазон: 0 %

Число точек: 3 Число точек: 3 Число точек: 3

Варьирование Z эффективное пробы Варьирование толщины пробы

Уточнение решения методом Гаусса-Ньютона

Дрейф коэффициента усиления Дрейф нуля энергетической шкалы

Дрейф разрешения спектрометра Независимый дрейф компонент

Учёт нелинейных искажений дрейфа энергетической калибровки

Число итераций: 5

Коэффициент демпфирования: 0 %

Нуклид Cs-137 не участвует в разложении. Его излучение отсечено выбором энергетического диапазона. Вследствие плохой обусловленности матрицы элементарных спектров Sr-90 и K-40 отключён режим коррекции энергетического дрейфа, что делает необходимым выполнение процедуры энергетической калибровки спектрометра перед измерением пробы. Шаблон обработки "Sr-90" не рекомендуется использовать, если есть возможность предварительного исследования пробы на гамма спектрометре.

Шаблон декомпозиции: Sr-90

Компоненты | Параметры 1 | **Параметры 2** | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Командный файл предварительной обработки

Режим обработки

Предварительно вычесть спектр непрерывного рассеяния

Вычесть фон Использовать фон из архива измерений

Оконный метод обработки Использовать спектры пиков как компоненты

В спектре присутствуют неучтенные компоненты Длина отрезка сплайна 3 ПШПВ

Допустимы отрицательные значения активностей Ранг сплайна 0

Помехоустойчивое оценивание. Один сплайн на весь диапазон

Границы МНК оценивания 2 ср.кв.откл. Игнорировать пики с погрешностями более 2000 %

Дополнительные параметры

Подставлять в качестве границ помеченные маркером каналы

Дополнить список компонент компонентами, имеющими линии вблизи маркера

Автоматический анализ состава

без участия оператора

Требуемый уровень коэффициента корреляции для включения компоненты (более) 0 %

Библиотека нуклидов Nuclides\LongLive.ncl

Сохранить Отмена Справка

На странице «Параметры» задаётся библиотека нуклидов, используемая при обработке.

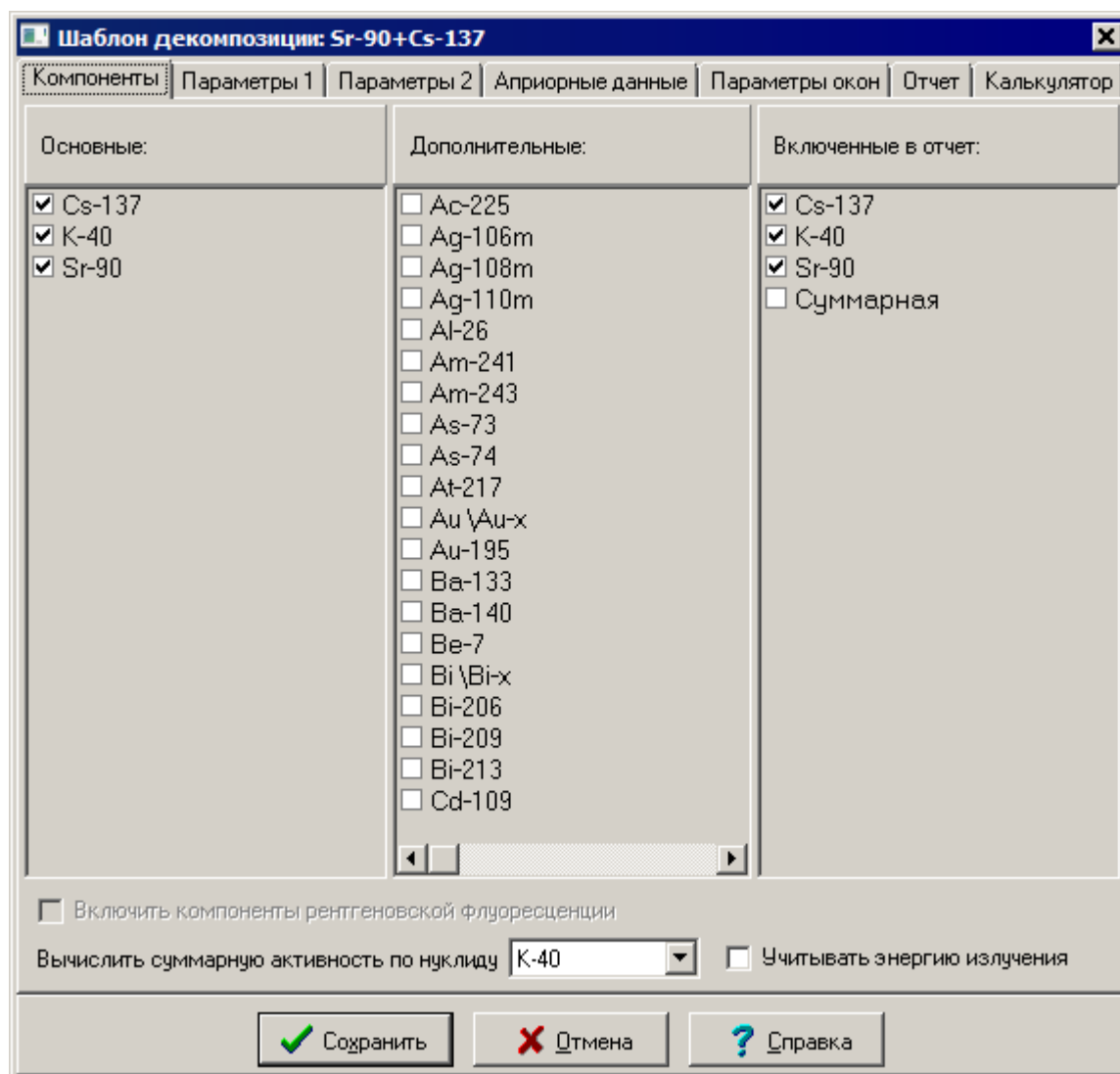
2. "Sr-90+Cs-137"

Область применения: измерение значений активности радионуклидов ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{40}K и ^{137}Cs в счетном образце и расчет параметра соответствия санитарным нормам - "В". Счетный образец может быть приготовлен как из нативного материала, так и с применением методов физического концентрирования (озоление, выпаривание, высушивание и т.п.).

Геометрия измерений: счетный образец представляет собой таблетку равной толщины диаметра стандартной измерительной кюветы ($\varnothing 70\text{мм}$).

Предполагаемый состав бета-излучающих радионуклидов в счетном образце: ^{90}Sr в состоянии радиоактивного равновесия с ^{90}Y , ^{137}Cs , ^{40}K .

Энергетический интервал: 400 - 3000 кэВ.



Шаблон декомпозиции: Sr-90+Cs-137

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Основные:	Дополнительные:	Включенные в отчет:
<input checked="" type="checkbox"/> Cs-137	<input type="checkbox"/> Ac-225	<input checked="" type="checkbox"/> Cs-137
<input checked="" type="checkbox"/> K-40	<input type="checkbox"/> Ag-106m	<input checked="" type="checkbox"/> K-40
<input checked="" type="checkbox"/> Sr-90	<input type="checkbox"/> Ag-108m	<input checked="" type="checkbox"/> Sr-90
	<input type="checkbox"/> Ag-110m	<input type="checkbox"/> Суммарная
	<input type="checkbox"/> Al-26	
	<input type="checkbox"/> Am-241	
	<input type="checkbox"/> Am-243	
	<input type="checkbox"/> As-73	
	<input type="checkbox"/> As-74	
	<input type="checkbox"/> At-217	
	<input type="checkbox"/> Au \Au-x	
	<input type="checkbox"/> Au-195	
	<input type="checkbox"/> Ba-133	
	<input type="checkbox"/> Ba-140	
	<input type="checkbox"/> Be-7	
	<input type="checkbox"/> Bi \Bi-x	
	<input type="checkbox"/> Bi-206	
	<input type="checkbox"/> Bi-209	
	<input type="checkbox"/> Bi-213	
	<input type="checkbox"/> Cd-109	

Включить компоненты рентгеновской флуоресценции

Вычислить суммарную активность по нуклиду: K-40 Учитывать энергию излучения

Сохранить | Отмена | Справка

В список определяемых нуклидов включён и Cs-137.

Шаблон декомпозиции: Sr-90+Cs-137

Компоненты: **Параметры 1** | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Общие параметры

Границы обработки, кэВ: 400 - 3000 []

Допустимая невязка: 2

Допустимый энергетический дрейф (%): 10 / 100 (текущий/общий)

Допустимый дрейф разрешения (%): 100

Дополнительная погрешность (%): 5

Корректировать энергетическую калибровку спектра по результатам обработки

Глобальный поиск решения

Варьирование усиления Варьирование нуля шкалы Варьирование разрешения

Диапазон: 20 % Диапазон: 2 % Диапазон: 0 %

Число точек: 100 Число точек: 10 Число точек: 3

Варьирование Z эффективное пробы Варьирование толщины пробы

Уточнение решения методом Гаусса-Ньютона

Дрейф коэффициента усиления Дрейф нуля энергетической шкалы

Дрейф разрешения спектрометра Независимый дрейф компонент

Учёт нелинейных искажений дрейфа энергетической калибровки

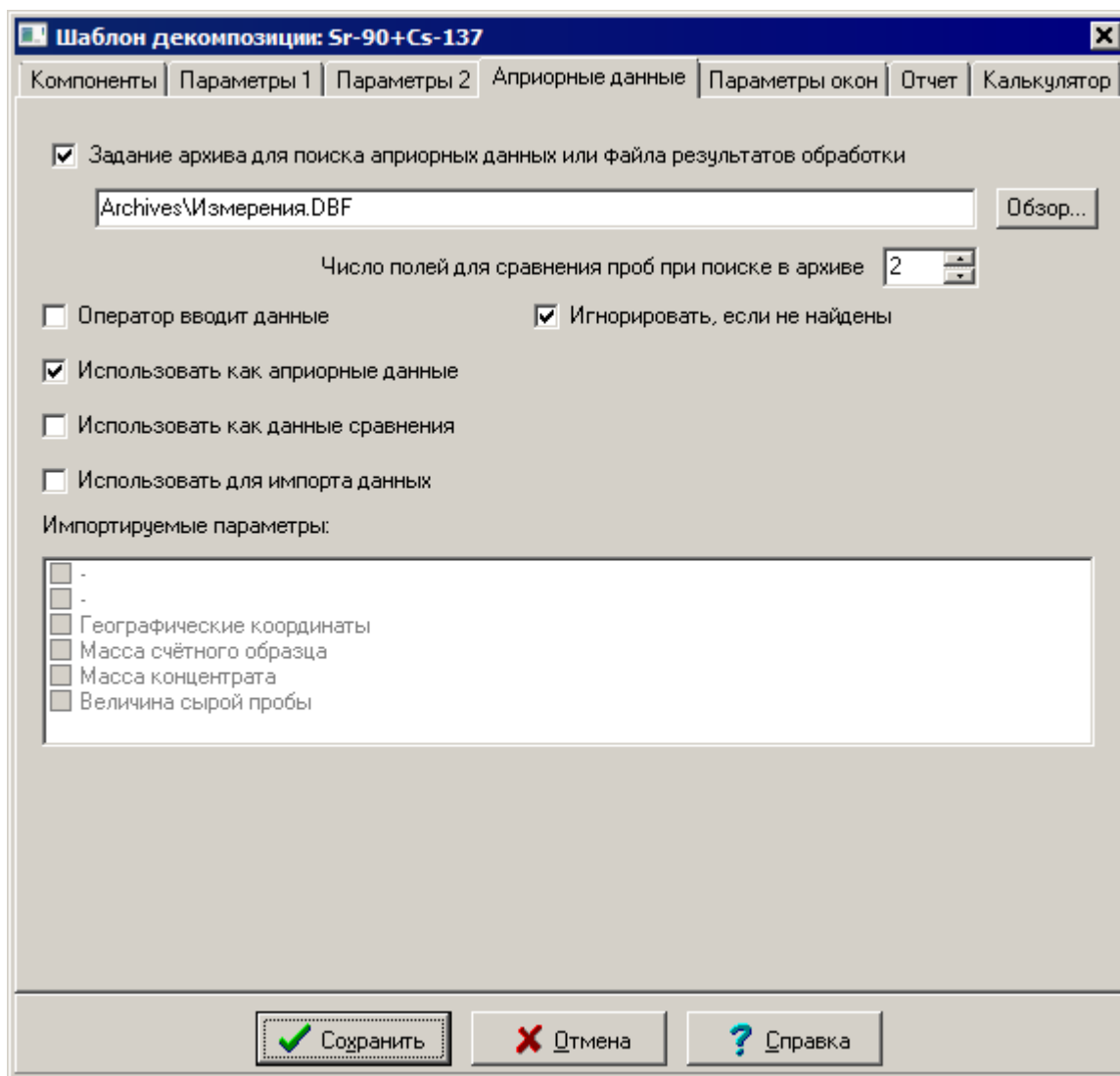
Число итераций: 100

Коэффициент демпфирования: 4 %

Сохранить Отмена Справка

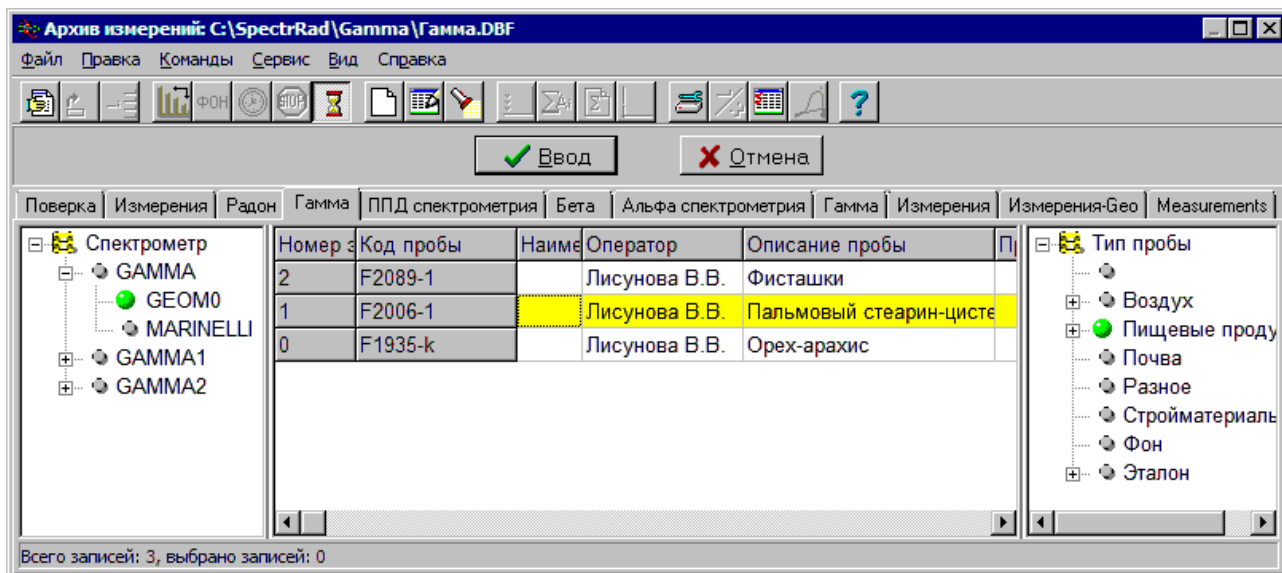
Отличие от шаблона «Sr-90» на странице «Параметры 1» в установленном диапазоне обработки (400 – 3000 кэВ) и во включении дрейфа коэффициента усиления и нуля шкалы в список определяемых параметров.

Содержание страницы «Параметры 2» не отличается от шаблона «Sr-90».




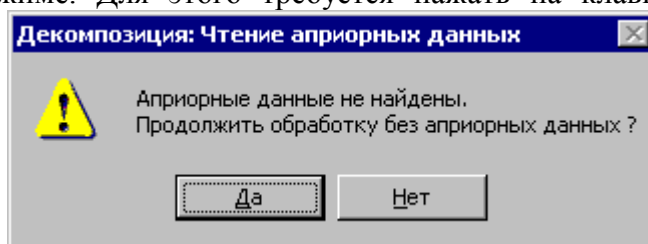
Шаблон "**Sr-90+Cs-137**" использует априорные данные об активностях нуклидов полученные на гамма спектрометре, что существенно повышает обусловленность системы уравнений и позволяет включить процедуру коррекции энергетического дрейфа спектрометра.

Программа будет искать данные гамма спектрометрии в архиве «Измерения.dbf». Поиск данных производится с конца архива. Так как задан режим сравнения записей только по одному (первому) полю, а этим полем в журнале измерений является шифр пробы, первая найденная запись с совпадающим шифром пробы будет считаться искомой и данные этой записи (активности Cs-137 и K-40) будут использованы в качестве априорных данных при обработке бета спектра. В случае если данные не будут найдены, программа предложит оператору самостоятельно указать нужную запись с данными об обработке гамма спектра для данной пробы:



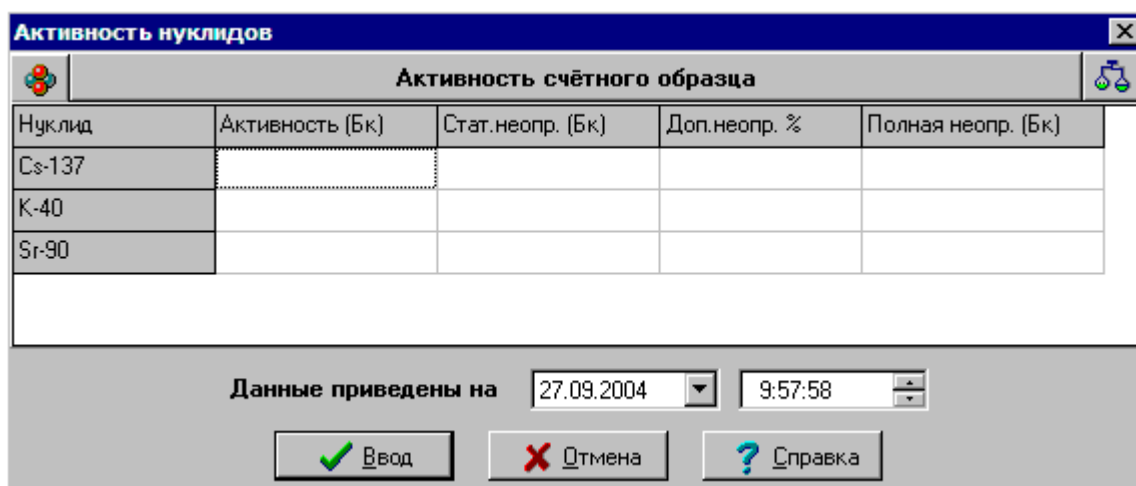
Оператор должен выбрать требуемую запись и нажать на клавишу .

Если требуемых данных нет в архиве, оператор может запросить ввод априорных данных в ручном режиме. Для этого требуется нажать на клавишу  и в


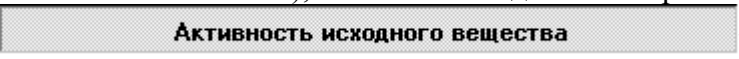


появившейся табличке  выбрать ответ «Нет».



В этом случае появится форма для ввода данных в ручном режиме:

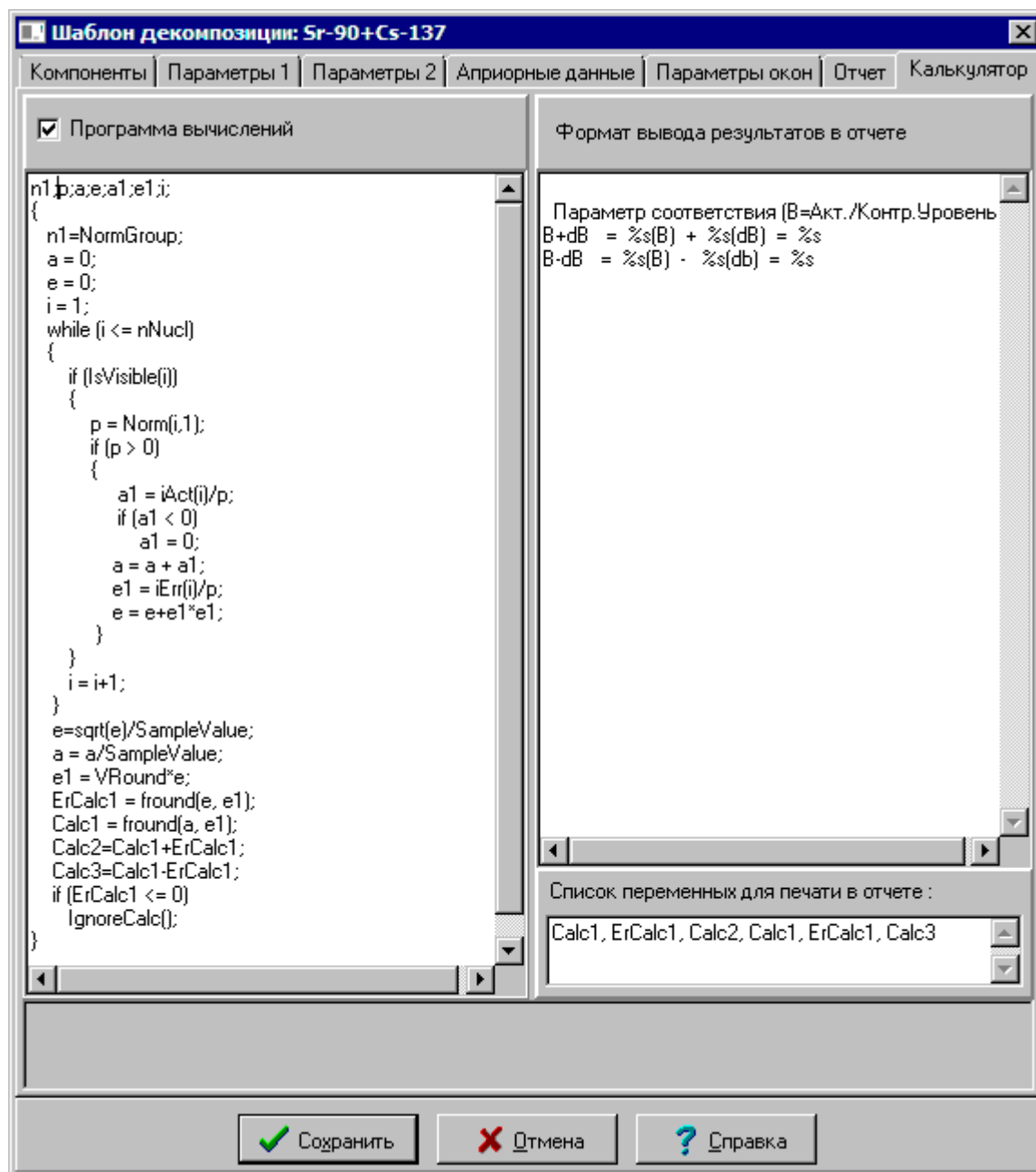


Оператор должен ввести данные по активностям и погрешностям Cs-137 и K-40, оставив пустой строку для Sr-90.

Клавиша  в табличке ввода значений позволяет вводить данные либо об активностях нуклидов в веществе счётного образца (при отжатом состоянии клавиши), либо в исходном материале (при нажатом состоянии клавиши ). При вводе

активностей исходного материала необходимо быть уверенным, что при концентрировании пробы не произошла утечка радионуклидов.

Клавиша  позволяет вводить данные либо в значениях полной активности счётного образца или всего исходного вещества использованного для концентрирования пробы (при отжатом состоянии клавиши), либо в значениях удельной активности счётного образца или исходного материала (при нажатом состоянии клавиши ).



Программа калькулятора рассчитывает параметр соответствия приведенным в отчете активностям нуклидов допустимым нормам для данного типа пробы.

Некоторые стандартные шаблоны обработки гамма спектров в «сцинтилляционной спектрометрии»

1. "EPH+Cs-137", "EPH+Cs-137_express"

Область применения: измерение значений активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{40}K , равновесных цепочек ^{232}Th и ^{226}Ra в счетном образце. Счетный образец может быть приготовлен как из нативного материала, так и с применением методов физического концентрирования (озоление, выпаривание, высушивание и т.п.).

Геометрия измерений: - одна из аттестованных геометрий измерений.

Предполагаемый состав гамма излучающих радионуклидов в счетном образце: ^{137}Cs , ^{40}K , равновесные цепочки ^{232}Th и ^{226}Ra

Сведения о счетном образце, используемые программой:

- масса пробы, отобранной на анализ (m_0);
- масса полученного концентрата (m_1);
- масса счетного образца (m_2).

Формула для расчета удельной активности исходной пробы:

$$A = A_m \cdot m_1 / m_0$$

Здесь: A - удельная активность исходной пробы (Бк/кг); A_m - удельная активность счетного образца (Бк/кг).

Энергетический интервал: 200 - 3000 кэВ.

Шаблон декомпозиции: EPH+Cs-137

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Общие параметры

Границы обработки, кэВ: 200 - 3000

Допустимая невязка: 2

Допустимый энергетический дрейф (%): 10 / 100 (текущий/общий)

Допустимый дрейф разрешения (%): 100

Дополнительная погрешность (%): 5

Корректировать энергетическую калибровку спектра по результатам обработки

Глобальный поиск решения

Варьирование усиления Варьирование нуля шкалы Варьирование разрешения

Диапазон: 10 % Диапазон: 0 % Диапазон: 0 %

Число точек: 51 Число точек: 3 Число точек: 3

Варьирование Z эффективное пробы Варьирование толщины пробы

Уточнение решения методом Гаусса-Ньютона

Дрейф коэффициента усиления Дрейф нуля энергетической шкалы

Дрейф разрешения спектрометра Независимый дрейф компонент

Учёт нелинейных искажений дрейфа энергетической калибровки

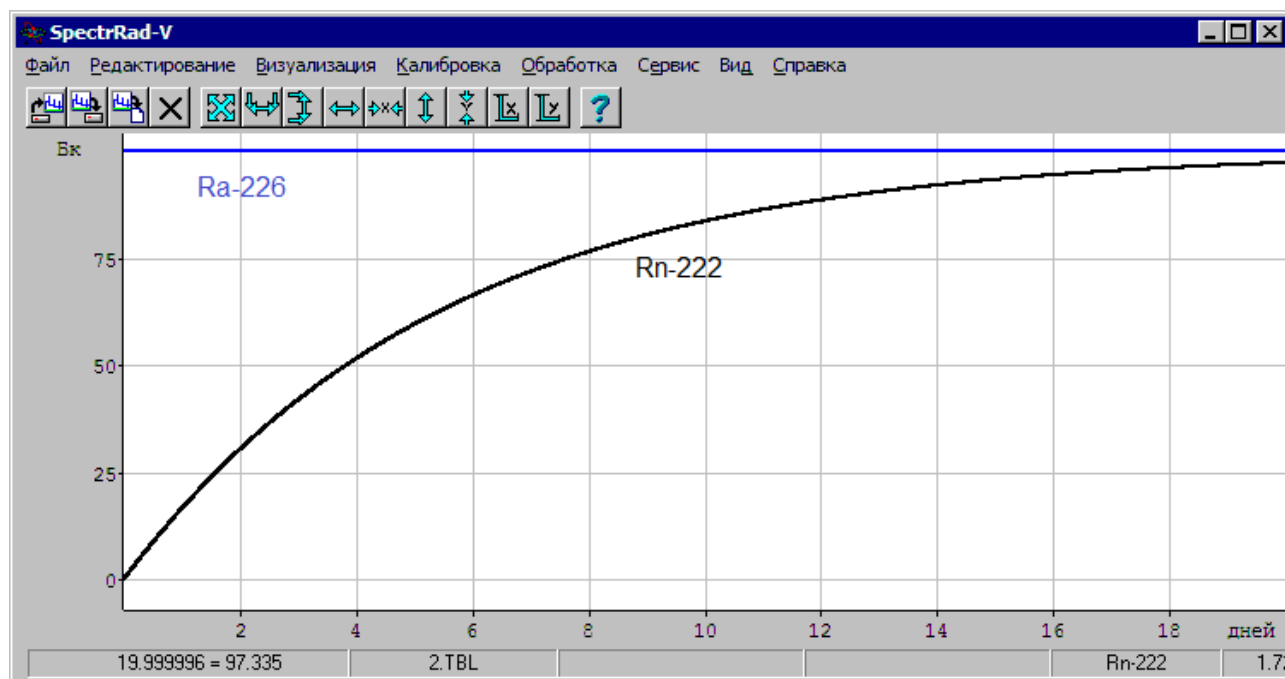
Число итераций: 100

Коэффициент демпфирования: 8 %

Сохранить Отмена Справка

Для поиска начального приближения к уточнению решения методом Гаусса-Ньютона используется варьирование коэффициента усиления, а варьирование нуля шкалы отключено поскольку, как показал опыт эксплуатации сцинтилляционных спектрометров, дрейфует в большей степени именно коэффициент усиления. При использовании современных компьютеров с большим быстродействием можно включить и варьирование нуля шкалы. Диапазон изменения коэффициента усиления и нуля шкалы спектрометра определяется в процессе его эксплуатации.

Поскольку используется энергетический интервал 200 - 3000 кэВ, Ra-226 определяется по излучению дочерних нуклидов в цепочке распада Rn-222. Для того чтобы Rn-222 находился в радиоактивном равновесии с Ra-226 требуется предварительная выдержка счётного образца в герметичном сосуде используемой при измерении геометрии в течение не менее чем 20 суток.

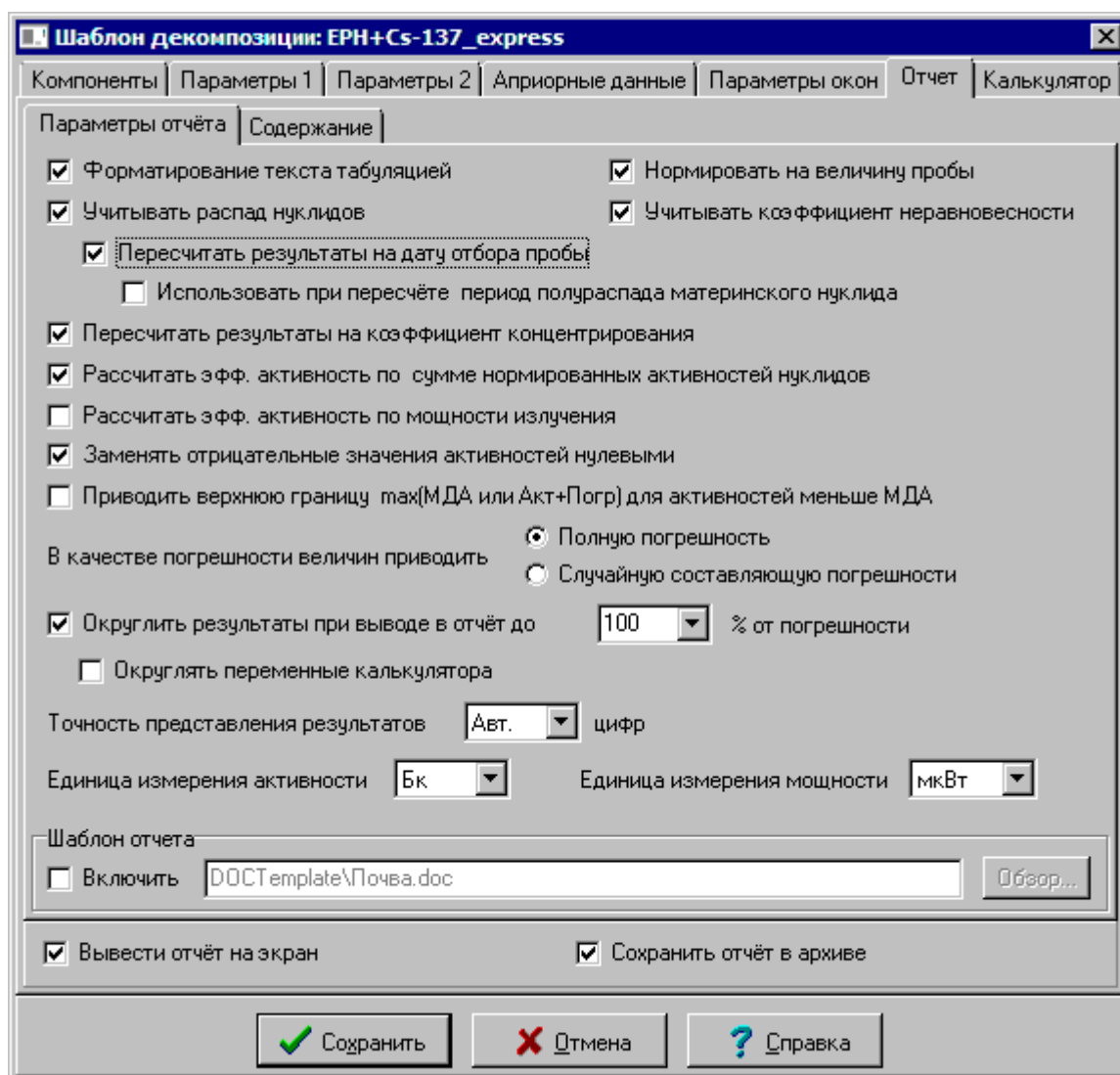


На рисунке приведён график накопления Rn-222 из Ra-226. Через 20 дней, при условии герметичности сосуда со счётным образцом, активность Rn-222 будет составлять > 97% активности Ra-226 при самых неблагоприятных начальных условиях.

При проведении экспрессных измерений активность Ra-226 определяется с учётом коэффициента неравновесности нуклидов в цепочке распада по формуле $A_{Ra-226} = A_{Rn-222} / (1 - K_{neq})$, где A_{Rn-222} - результат экспрессного определения активности радия по излучению дочерних Rn-222 связанного с материалом счётного образца в сухом незагерметизированном счётном образце, K_{neq} , в данном случае определяется эманацией свободного радона из измерительной ёмкости и примерно равен коэффициенту эманации.

Коэффициент неравновесности для нуклидов (в данном случае для Ra-226 определяемому по связанному Rn-222) для конкретных типов проб указывается в нормативах и константах (п. главного меню «Сервис/Нормативы и константы...»). Поскольку экспрессное определение Ra-226 в любом случае грешит погрешностями (требуемый нам коэффициент эманации зависит не только от типа пробы, но и от вида контейнера в которой находится счётный образец), дополнительную неопределённость для Ra-226 при расчёте элементарного спектра рекомендуется устанавливать равной 20% и более.

Шаблон "ЕРН+Cs-137_express" отличается от шаблона "ЕРН+Cs-137" установкой флажка «Учитывать коэффициент неравновесности» на странице «Отчёт»:



Параметры отчёта определяют, прежде всего, форму внутреннего отчёта, но некоторые параметры влияют и на форму отчёта для печати:

- *Нормировать на величину пробы*
- *Учитывать распад нуклидов*
- *Пересчитать результаты на дату отбора пробы*
- *Учитывать коэффициент неравновесности*
- *Пересчитать результаты на коэффициент концентрирования*
- *В отчёте приводить верхнюю границу для активностей меньше МДА*
- *В качестве погрешности величин приводить полную погрешность / случайную составляющую погрешности*
- *Округлить результаты при выводе в отчёт до n % от погрешности*
- *Точность представления результатов*
- *Единица измерения активности*
- *Единица измерения мощности*

Страница «Содержание» действует только для внутреннего отчёта, пояснений не требует и здесь не приводится.

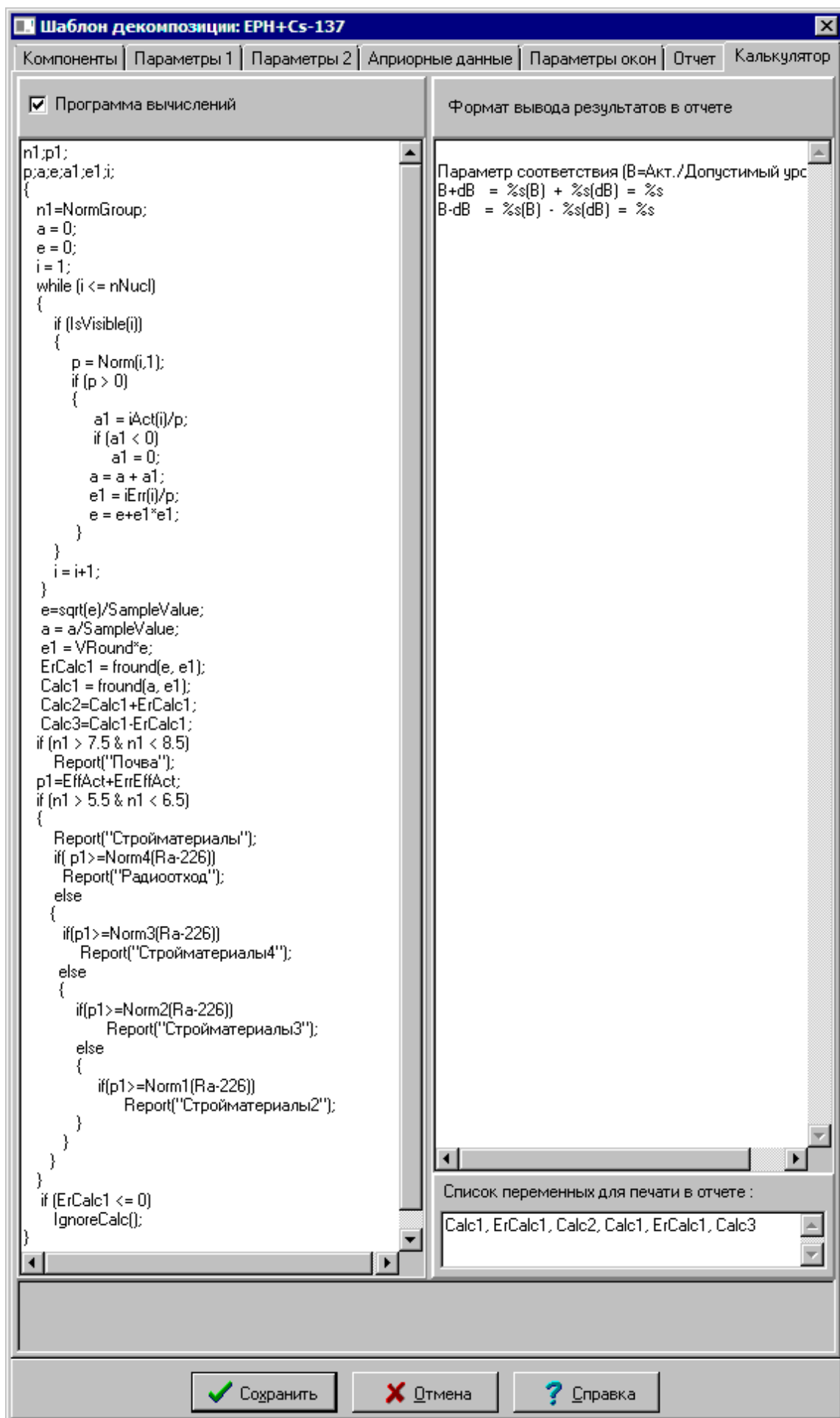
Процедура вычисляет и суммарную гамма активность пробы, но во внутреннем отчёте она приведена не будет. В отчёте для печати, если в используемом шаблоне отчёта есть метка для суммарной активности, она будет присутствовать.

В архиве «Поверка» сохраняются параметры энергетического дрейфа спектрометра:

Номер	Энергетический	Коэффициент ус	Нуль шкалы кан	Дрейф разрешен	Линия 1 (кэВ)	Разреш
82	32.5	1.323	31.2	11.5	661.53	49.7
81	32.5	1.323	31.2	9.99	661.53	49
80	32.3	1.322	31.2	12	661.53	49.9
79	32.2	1.321	31.1	13.8	661.53	50.7
78	31.9	1.318	31.5	12.3	661.53	50
77	30.5	1.304	30.5	6.77	661.53	47.5
76	29.4	1.293	30.2	9.25	661.53	48.7
75	30.1	1.299	30.2	9.68	661.53	48.8
74	30.4	1.302	29.9	9.95	661.53	49
73	31.3	1.312	30.9	8.28	661.53	48.2

Используя данные архива «Поверка» можно оценить диапазон изменения коэффициента усиления и нуля шкалы спектрометра.

Страница «Параметры окон» шаблона декомпозиции в данном шаблоне не используется. Для сцинтилляционной спектрометрии она используется только при оконной методике обработки спектров, а, как показала практика, использовать оконную методику в сцинтилляционной спектрометрии не рекомендуется: проигрыш в эффективности оценок очевиден (не выполняется требование теоремы Гаусса-Маркова), а выигрыша нет ни в чём.



Программа калькулятора вычисляет параметр соответствия пробы установленным нормативам и определяет требуемый шаблон отчёта в зависимости от типа пробы и величины удельной эффективной активности.

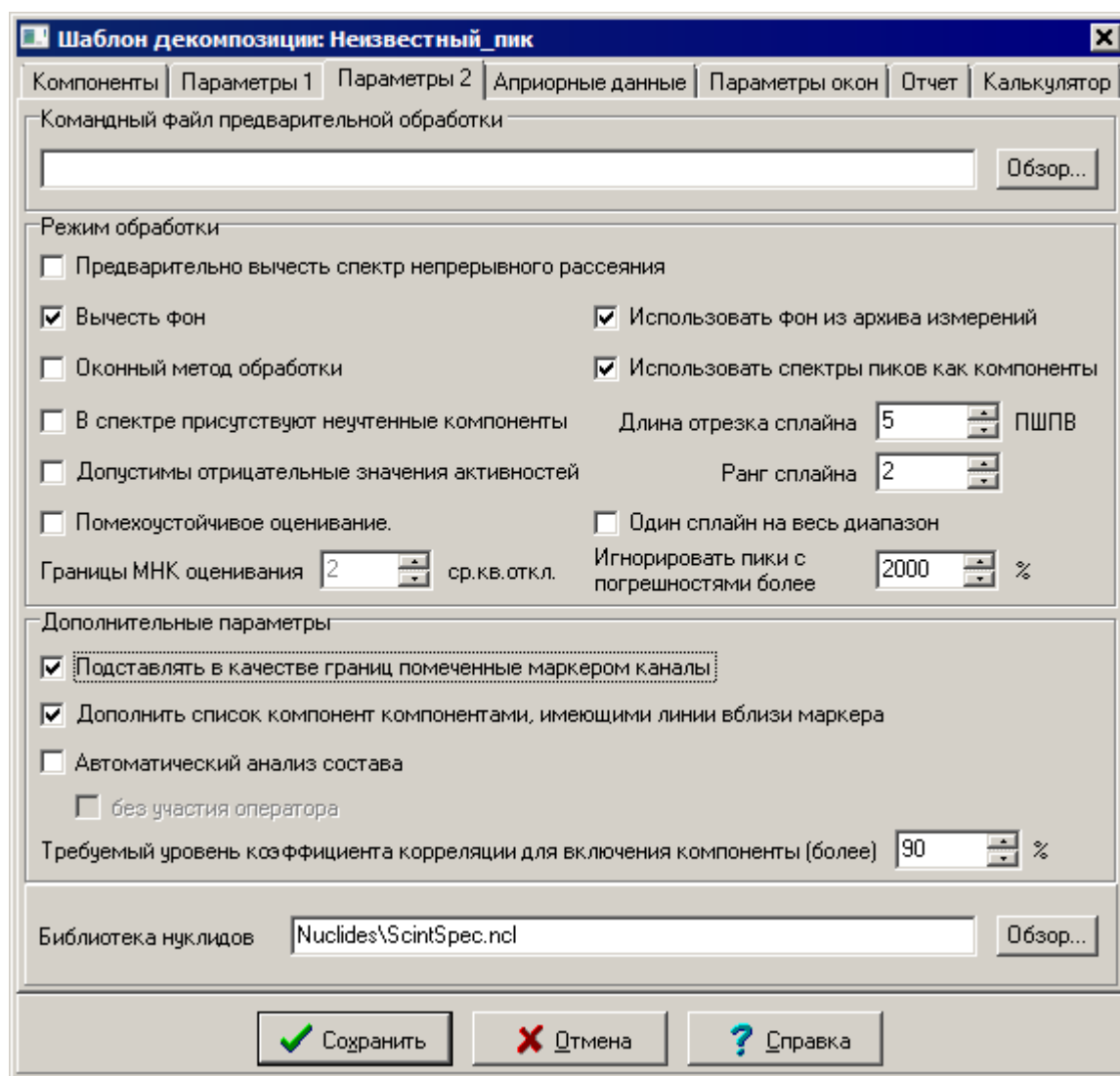
2. "Неизвестный пик"

Область применения: оценка нуклидного состава и ориентировочной активности нуклида отсутствующего в списке основных компонент.

Геометрия измерений: - одна из аттестованных геометрий измерений.

Предполагаемый состав гамма излучающих радионуклидов в счетном образце: определяется используемой таблицей нуклидов.

Энергетический интервал: 200 - 3000 кэВ.



Отличие от шаблона "EPH+Cs-137" на странице «Параметры 2». Здесь в группе «Режим обработки» установлена галочка «Использовать спектры пиков как компоненты, задана длина отрезка сплайна и ранг сплайна. Кроме этого в группе «Дополнительные параметры» установлен режим «Подставлять в качестве границ помеченные маркером каналы» и «Дополнить список компонент компонентами, имеющими линии вблизи маркера». Оператор предварительно должен пометить маркерами область обработки и установить подвижный маркер на вершину неизвестного пика. Область обработки рекомендуется ограничить диапазоном $E_p - 5 \cdot W < E < E_p + 5 \cdot W$. Здесь: E_p – энергия пика, W – ширина пика на половине

высоты. В качестве дополнительных компонент в этом случае будут использоваться спектры пиков, поскольку спектры пиков рассчитываются и легче и точнее полных спектров компонент. В качестве основных компонентов разложения оператор может задать полные спектры нуклидов чье присутствие вероятно в спектре:

Основные:	Дополнительные:	Включенные в отчет:
<input type="checkbox"/> Am-241	<input type="checkbox"/> Ac-225	<input checked="" type="checkbox"/> K-40
<input type="checkbox"/> Ce-139	<input type="checkbox"/> Ag-106m	<input checked="" type="checkbox"/> Ra-226
<input type="checkbox"/> Co-57	<input type="checkbox"/> Ag-108m	<input checked="" type="checkbox"/> Th-232
<input type="checkbox"/> Co-60	<input type="checkbox"/> Ag-110m	
<input type="checkbox"/> Cs-134	<input type="checkbox"/> Al-26	
<input type="checkbox"/> Cs-137	<input type="checkbox"/> Am-241	
<input type="checkbox"/> Eu-152	<input type="checkbox"/> Am-243	
<input type="checkbox"/> Hg-203	<input type="checkbox"/> As-73	
<input type="checkbox"/> K	<input type="checkbox"/> As-74	
<input checked="" type="checkbox"/> K-40	<input type="checkbox"/> At-217	
<input type="checkbox"/> Mn-54	<input type="checkbox"/> Au \Au-x	
<input checked="" type="checkbox"/> Ra-226	<input type="checkbox"/> Au-195	
<input type="checkbox"/> Ra-226v	<input type="checkbox"/> Ba-133	
<input type="checkbox"/> Rn-222	<input type="checkbox"/> Ba-140	
<input type="checkbox"/> Sn-113	<input type="checkbox"/> Be-7	
<input type="checkbox"/> Th \Th-x	<input type="checkbox"/> Bi \Bi-x	
<input checked="" type="checkbox"/> Th-232	<input type="checkbox"/> Bi-206	
<input type="checkbox"/> Th-232v	<input type="checkbox"/> Bi-209	
<input type="checkbox"/> U \U-x	<input type="checkbox"/> Bi-213	
<input type="checkbox"/> Y-88	<input type="checkbox"/> Cd-109	
<input type="checkbox"/> Zn-65		

Включить компоненты рентгеновской флуоресценции

Вычислить суммарную активность по нуклиду Учитывать энергию излучения

Сохранить Отмена Справка

В колонке «Основные» приведены нуклиды, для которых рассчитаны полные элементарные спектры¹⁰. В колонке «Дополнительные» нуклиды для которых будут рассчитаны спектры пиков по калибровкам спектрометра и заданной таблице нуклидов.

¹⁰ Элементарный спектр – спектр нуклида, нормированный на число распадов.

При запуске процедуры обработки на экран будет выведено окно со списком нуклидов подозреваемых в формировании неизвестного пика:

Выбор дополнительных компонент					
		<input checked="" type="button" value="Ввод"/>	<input type="button" value="Отмена"/>	<input type="button" value="Справка"/>	
Компонент	↑ Тест 1 %	Тест 2 %	Тест 3 %	Тест 4 %	Период полура
Tc-95	99.52	100	100	99.95	20 час.
Nb-95	99.52	100	100	99.95	34.99 дней
Pm-146	95.92	100	100	96.73	5.53 лет
Zr-95	94.69	100	100	98.43	64.03 дней
Pm-143	93.81	100	100	95.79	265 дней
Eu-152	93.44	100	100	97.61	13.52 лет
Cs-134	92.72	100	100	93.49	2.065 лет
Eu-156	92.38	100	100	91.74	15.19 дней
La-138	91.46	100	100	95.85	1.03E11 лет

Всего компонент: 36, можно выбрать: 36, выбрано: 9

В окне приводится список нуклидов и четыре рассчитанных для каждого нуклида тестовых величины характеризующих вероятность присутствия нуклида в пробе. Для гамма спектра без вычтенного спектра непрерывного рассеяния три тестовых величины: Тест2, Тест3 и Тест4 практически всегда равны или близки к 100% и не играют роли. Тест1 – коэффициент корреляции спектра нуклида со спектром пробы (свёртка спектров) определяет включение или не включение нуклида в список. Нуклиды с коэффициентом корреляции превышающим порог, заданный на странице «Параметры 1» (в примере 90%) будут включены в список.

3. "Автоматический анализ"

Область применения: оценка нуклидного состава и ориентировочной активности нуклидов, формирующих спектр счётного образца.

Геометрия измерений: - одна из аттестованных геометрий измерений.

Предполагаемый состав гамма излучающих радионуклидов в счётном образце: определяется используемой таблицей нуклидов.

Энергетический интервал: 200 - 3000 кэВ.

Отличие от шаблона «Неизвестный пик» на странице «Параметры 2» - установлена галочка в пункте «Автоматический анализ состава». При этом список компонент разложения будет дополнен всеми нуклидами, чьи линии попадают в используемый при обработке энергетический интервал. Таблица со списком подозреваемых нуклидов выводится на экран только в случае отсутствия «галочки» в пункте «без участия оператора».

4. "ВФУ"

Область применения: измерение значений активности радионуклидов ^7Be и ^{131}I на фоне естественно радиоактивных нуклидов в атмосферном воздухе. Счётным образцом является материал фильтра после протяжки через него воздуха. Счетный образец может быть приготовлен как из нативного материала фильтра, так и с применением методов физического концентрирования (озоление).

Геометрия измерений: - одна из аттестованных геометрий измерений.

Предполагаемый состав гамма излучающих радионуклидов в счетном образце: ${}^7\text{Be}$, ${}^{131}\text{I}$, ${}^{137}\text{Cs}$, ${}^{40}\text{K}$, дочерние нуклиды в цепочках распада ${}^{220}\text{Rn}$ и ${}^{222}\text{Rn}$

Сведения о счетном образце, используемые программой:

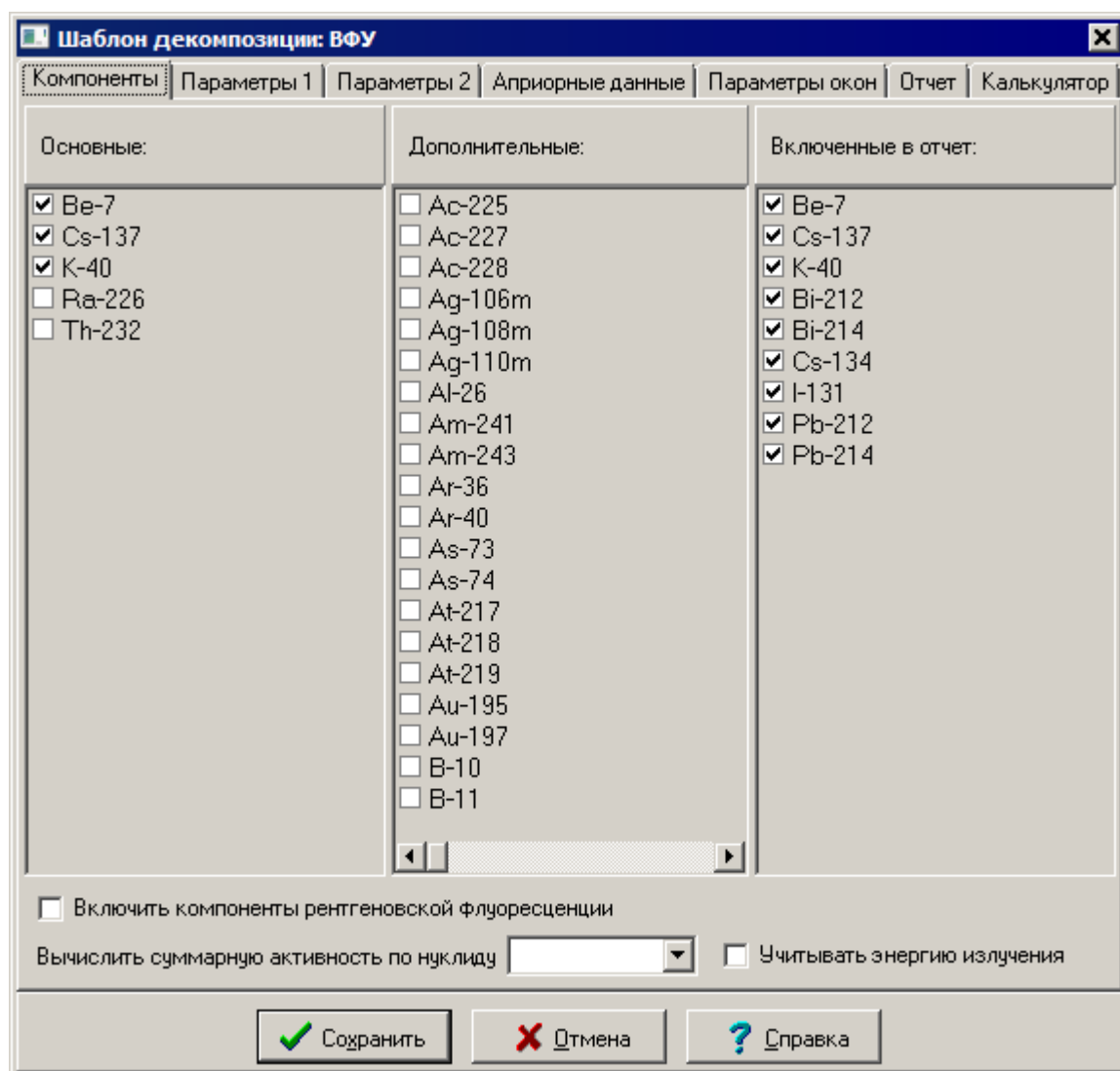
- производительность воздуходувки (P) куб.м/час;
- длительность протяжки воздуха через фильтр (t) часов;
- коэффициент улавливания для фильтра (K).

Формула для расчета удельной активности нуклидов в атмосферном воздухе:

$$A_0 = \frac{A(t) \cdot \lambda}{P \cdot K \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t))}$$

Здесь: $A(t)$ - активность нуклида на фильтре на момент окончания протяжки (Бк), t - длительность протяжки (час), λ - постоянная распада нуклида (час⁻¹), A_0 - активность нуклида в воздухе (Бк/куб.м).

Энергетический интервал: 200 - 3000 кэВ.



Компоненты разложения спектра.

Шаблон декомпозиции: ВФУ

Компоненты: **Параметры 1** | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Общие параметры

Границы обработки, кэВ: 200 - 3200 []

Допустимая невязка: 2

Допустимый энергетический дрейф (%): 10 / 100 (текущий/общий)

Допустимый дрейф разрешения (%): 100

Дополнительная погрешность (%): 10

Корректировать энергетическую калибровку спектра по результатам обработки

Глобальный поиск решения

Варьирование усиления Варьирование нуля шкалы Варьирование разрешения

Диапазон: 10 % Диапазон: 0 % Диапазон: 0 %

Число точек: 50 Число точек: 3 Число точек: 3

Варьирование Z эффективное пробы Варьирование толщины пробы

Уточнение решения методом Гаусса-Ньютона

Дрейф коэффициента усиления Дрейф нуля энергетической шкалы

Дрейф разрешения спектрометра Независимый дрейф компонент

Учёт нелинейных искажений дрейфа энергетической калибровки

Число итераций: 100

Коэффициент демпфирования: 8 %

Шаблон декомпозиции: ВФУ

Компоненты | Параметры 1 | **Параметры 2** | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Командный файл предварительной обработки

Режим обработки

Предварительно вычесть спектр непрерывного рассеяния

Вычесть фон Использовать фон из архива измерений

Оконный метод обработки Использовать спектры пиков как компоненты

В спектре присутствуют неучтенные компоненты Длина отрезка слайна ПШПВ

Допустимы отрицательные значения активностей Ранг слайна

Помехоустойчивое оценивание. Один слайн на весь диапазон

Границы МНК оценивания ср.кв.откл. Игнорировать пики с погрешностями более %

Дополнительные параметры

Подставлять в качестве границ помеченные маркером каналы

Дополнить список компонент компонентами, имеющими линии вблизи маркера

Автоматический анализ состава

без участия оператора

Требуемый уровень коэффициента корреляции для включения компоненты (более) %

Библиотека нуклидов Обзор...

Сохранить Отмена Справка

Параметры декомпозиции.

Расчёт активностей нуклидов в воздухе реализуется в программируемом калькуляторе:

Шаблон декомпозиции: ВФУ

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | **Калькулятор**

Программа вычислений

```

k;ka;vol;d;act;err;s:e1;tcool;dc;expc;expd;act1;act2;
{
  ka=1; // Эффективность фильтра
  d = abs(Dsample-Dexpose); // Число дней прокачки
  tcool = (Dact-Dsample); // Время распада (дней)
  s = Size*24; // Кол-во прокачанного воздуха за день куб.м
  if (s <= 0)
  {
    s=input("Мощность ВФУ (куб м/час)");
    s = s*24; // Количество прокач. воздуха за день
  }
  k=s*ka; // производительность 100000 - коэффициент для удобства представления
  vol = k*d; // Объем прокачанного воздуха
  Print("\n\nМощность ВФУ (куб.м/час): %s, длительность фильтрации (часов): %s", Size, d*24);
  Print("\n\nОбъем прокачанного воздуха (куб.м): %s\n\n", vol);
  k = k/1000000.; // 1000000 - коэффициент для удобства представления (мкБк)
  vol = vol/1000000;

  dc = (24*3600*0.69314718)/HalfLife(Be-7); // постоянная распада
  // Учёт распада - накопления на фильтре
  expd = 1.-exp(-dc*d);
  act = Act(Be-7)*dc/expd;
  err=Err(Be-7)*dc/expd;
  // Учёт распада от отбора до измерения
  act=act*exp(dc*tcool)/k;
  err=err*exp(dc*tcool)/k;
  e1 = VRound*err;
  ErCalc3 = fround(err, e1);
  Calc3 = fround(act, e1);

  dc = (24*3600*0.69314718)/HalfLife(Cs-134); // постоянная распада
  expc = exp(-dc*tcool);
  act = Act(Cs-134)/(expc*vol);
  err = Err(Cs-134)/(expc*vol);
  e1 = VRound*err;
  ErCalc2 = fround(err, e1);
  Calc2 = fround(act, e1);

  dc = (24*3600*0.69314718)/HalfLife(Cs-137); // постоянная распада
  expc = exp(-dc*tcool);
  act = Act(Cs-137)/(expc*vol);
  err = Err(Cs-137)/(expc*vol);
  e1 = VRound*err;
  ErCalc1 = fround(err, e1);
  Calc1 = fround(act, e1);

  dc = (24*3600*0.69314718)/HalfLife(I-131); // постоянная распада
  // Учёт распада - накопления на фильтре
  expd = 1.-exp(-dc*d);
  act = Act(I-131)*dc/expd;
  err=Err(I-131)*dc/expd;
  // Учёт распада от отбора до измерения
  act=act*exp(dc*tcool)/k;
  err=err*exp(dc*tcool)/k;
  e1 = VRound*err;
  ErCalc4 = fround(err, e1);
  Calc4 = fround(act, e1);
}
  
```

Формат вывода результатов в отчете

```

\n\nАктивность нуклидов в воздухе (мкБк/куб. м):
Be-7\n\t%с +/- %с
Cs-134\n\t%с +/- %с
Cs-137\n\t%с +/- %с
I-131\n\t%с +/- %с
  
```

Список переменных для печати в отчете :

```

Calc3, ErCalc3, Calc2, ErCalc2, Calc1, ErCalc1, Calc4,
ErCalc4
  
```

Сохранить | Отмена | Справка

Некоторые стандартные шаблоны обработки гамма спектров в «ППД спектрометрии»

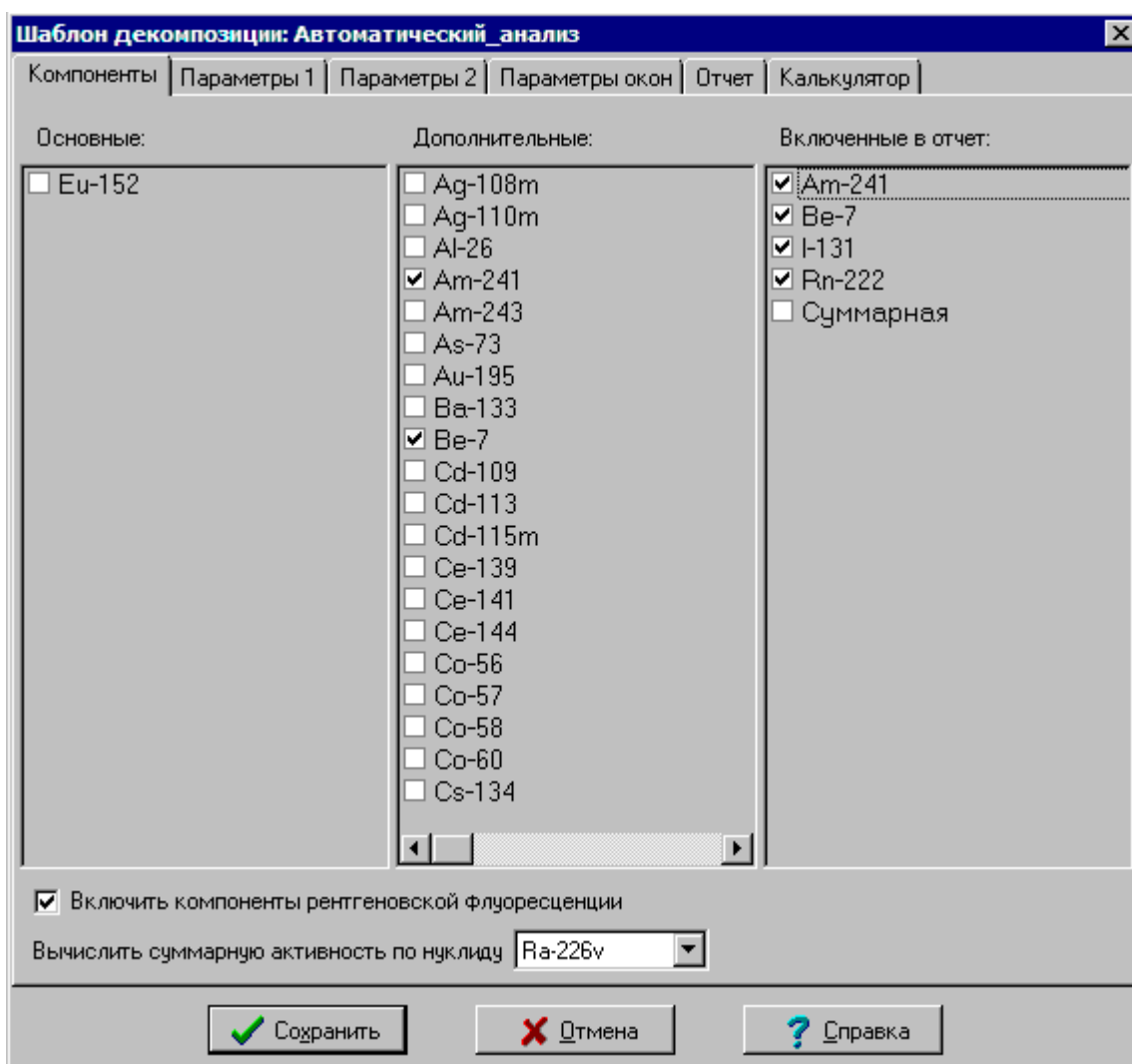
1. "Автоматический анализ"

Область применения: измерение значений активности радионуклидов в счетном образце. Счетный образец может быть приготовлен как из нативного материала, так и с применением методов физического концентрирования (озоление, выпаривание, высушивание и т.п.).

Геометрия измерений: - одна из аттестованных геометрий измерений.

Предполагаемый состав гамма излучающих радионуклидов в счетном образце: определяется используемой таблицей нуклидов.

Энергетический интервал: в зависимости от настройки спектрометра. Для коаксиальных германиевых детекторов обычно 30 - 1800 кэВ.



В качестве компонент в данном примере шаблона "Автоматический анализ" указаны четыре нуклида, которые будут обязательно включены в процедуру декомпозиции. Итоговый перечень нуклидов включённых в декомпозицию будет определяться используемой таблицей нуклидов и набором пиков в спектре пробы.

Шаблон декомпозиции: Автоматический анализ

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Общие параметры

Границы обработки, кэВ: 40 - 2250 []

Допустимая невязка: 5

Допустимый энергетический дрейф (%): 0.2 / 100 (текущий/общий)

Допустимый дрейф разрешения (%): 100

Дополнительная погрешность (%): 5

Корректировать энергетическую калибровку спектра по результатам обработки

Глобальный поиск решения

Варьирование усиления Варьирование нуля шкалы Варьирование разрешения

Диапазон: 0 % Диапазон: 0 % Диапазон: 0 %

Число точек: 3 Число точек: 3 Число точек: 3

Варьирование Z эффективное пробы Варьирование толщины пробы

Уточнение решения методом Гаусса-Ньютона

Дрейф коэффициента усиления Дрейф нуля энергетической шкалы

Дрейф разрешения спектрометра Независимый дрейф компонент

Учёт нелинейных искажений дрейфа энергетической калибровки

Число итераций: 100

Коэффициент демпфирования: 8 %

Быстродействие даже современных ПК, к сожалению пока не позволяет для «ППД» спектрометрии использовать **глобальный поиск решения**, поэтому для коррекции энергетического дрейфа используется только процесс локального спуска Гаусса-Ньютона. Галочка в пункте «**Независимый дрейф компонент**» делает систему не слишком устойчивой, поэтому рекомендуется использовать **коэффициент демпфирования** отличный от нуля. Подробно назначение параметров процедуры декомпозиции дано в руководстве пользователя пакета «СПЕКТРРАД» (гл. «Создание шаблонов декомпозиции»).

Шаблон декомпозиции: Автоматический анализ

Компоненты | Параметры 1 | **Параметры 2** | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Командный файл предварительной обработки

Режим обработки

Предварительно вычесть спектр непрерывного рассеяния

Вычесть фон Использовать фон из архива измерений

Оконный метод обработки Использовать спектры пиков как компоненты

В спектре присутствуют неучтенные компоненты Длина отрезка сплайна 3 ПШПВ

Допустимы отрицательные значения активностей Ранг сплайна 0

Помехоустойчивое оценивание Один сплайн на весь диапазон

Границы МНК оценивания 2 ср.кв.откл. Игнорировать пики с погрешностями более 2000 %

Дополнительные параметры

Подставлять в качестве границ помеченные маркером каналы

Дополнить список компонент компонентами, имеющими линии вблизи маркера

Автоматический анализ состава

без участия оператора

Требуемый уровень коэффициента корреляции для включения компоненты (более) 30 %

Библиотека нуклидов Nuclides\LongLive_Auto.ncl

Сохранить Отмена Справка

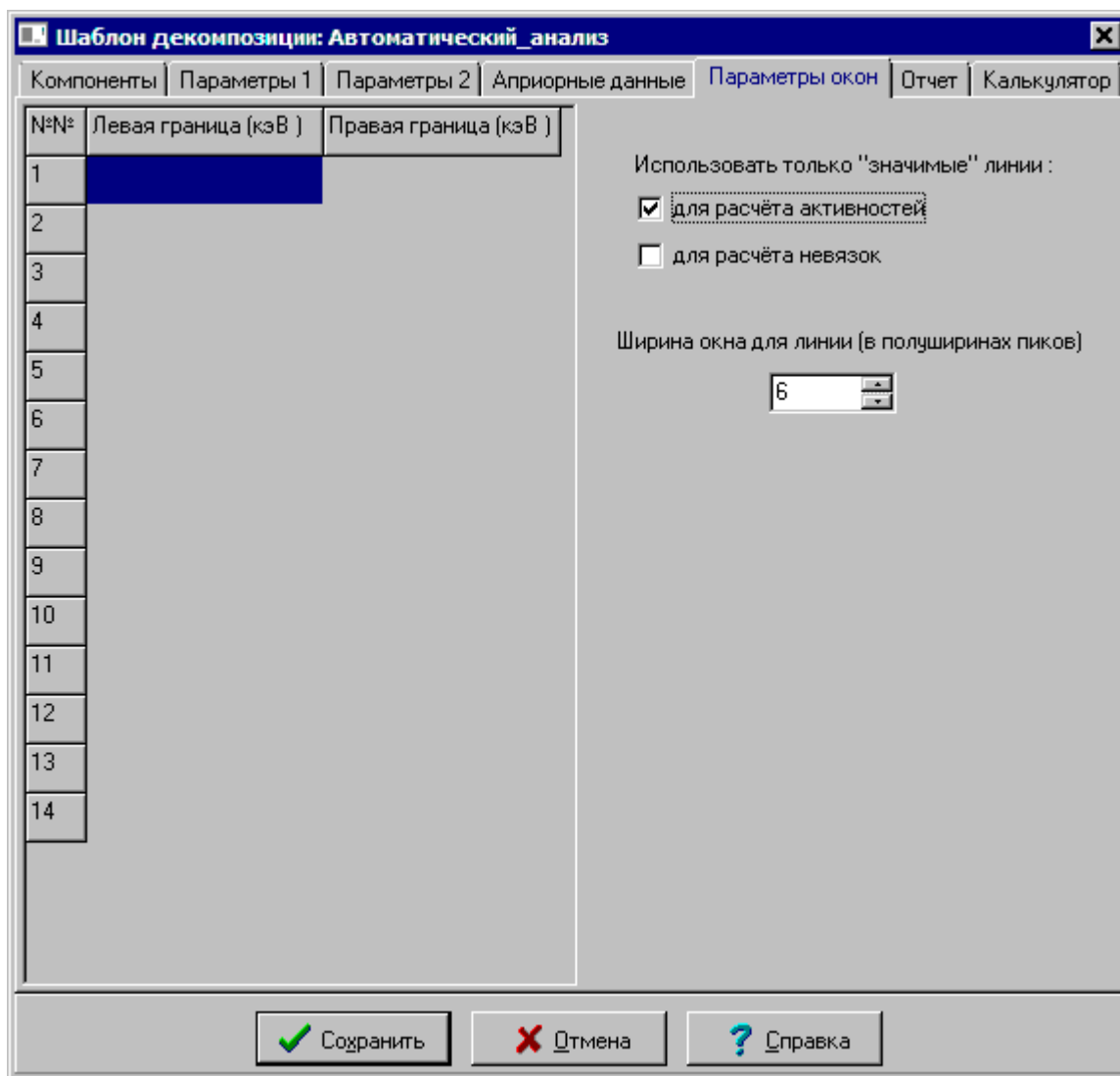
Шаблон "Автоматический анализ" назван так, потому что в группе «Дополнительные параметры» стоит галочка «Автоматический анализ состава». Поскольку галочка в пункте «без участия оператора» отсутствует, анализ в действительности полуавтоматический: после предварительного анализа спектра по присутствующим в нём пикам, программа окончательный выбор нуклидов предложит сделать оператору:

Выбор дополнительных компонент					
↓ Компонент	Тест 1 %	Тест 2 %	Тест 3 %	Тест 4 %	Период полураспада
Cs-136	7.291	64.22	65.63	66.51	13.01 дней
Cs-137	89.46	100	100	94.49	30.08 лет
Cu-67	41.75	100	100	76.39	61.83 дней
Eu-152	74.05	98.46	97.91	76.72	13.52 лет
Eu-154	32.69	97.38	87.88	66.22	8.601 лет
Eu-155	63.54	97.72	96.62	72.7	4.753 лет
Eu-156	34.95	70.3	72.51	63.51	15.19 дней
Fe-59	-0.1172	100	100	50.46	44.49 дней
Fr-221	0	22.92	28.04	86.2	4.9 мин.

Всего компонент: 149, можно выбрать: 100, выбрано: 40

Четыре рассчитанных параметра Тест 1 – Тест 4 говорят о вероятности присутствия нуклида в спектре, а опыт оператора и период полураспада нуклидов позволят сделать окончательный выбор. Впрочем, всегда можно всю ответственность переложить на программу и, ничего не меняя, просто нажать на кнопку

Рабочая таблица нуклидов использованная в шаблоне содержит 194 нуклида, частично объединённых в равновесные цепочки, и включает все гамма излучающие естественно радиоактивные нуклиды, нуклиды, используемые в медицинских процедурах, и основные продукты деления урана и трансурановых и активации.



В «ППД» спектрометрии всегда присутствует понятие «окна»: в процедуре декомпозиции участвует не весь спектр, а выбранные «окна» спектра. Выбор окон определяется набором нуклидов участвующим в процедуре разложения спектра и набором линий гамма излучения для каждого из нуклидов. При этом оператор может указать: какие линии нуклида можно использовать для оценки его активности и для расчёта невязок, установив или удалив, соответствующие галочки в группе «Использовать только “значимые” линии нуклидов». При установке галочек программа для расчёта активности нуклида и/или невязок будет использовать только те линии нуклида, которые оператор предварительно пометил в таблице нуклидов как “значимые”, в противном случае – все линии нуклида приведённые в таблице нуклидов.

2. "Автоматический анализ SPLINE"

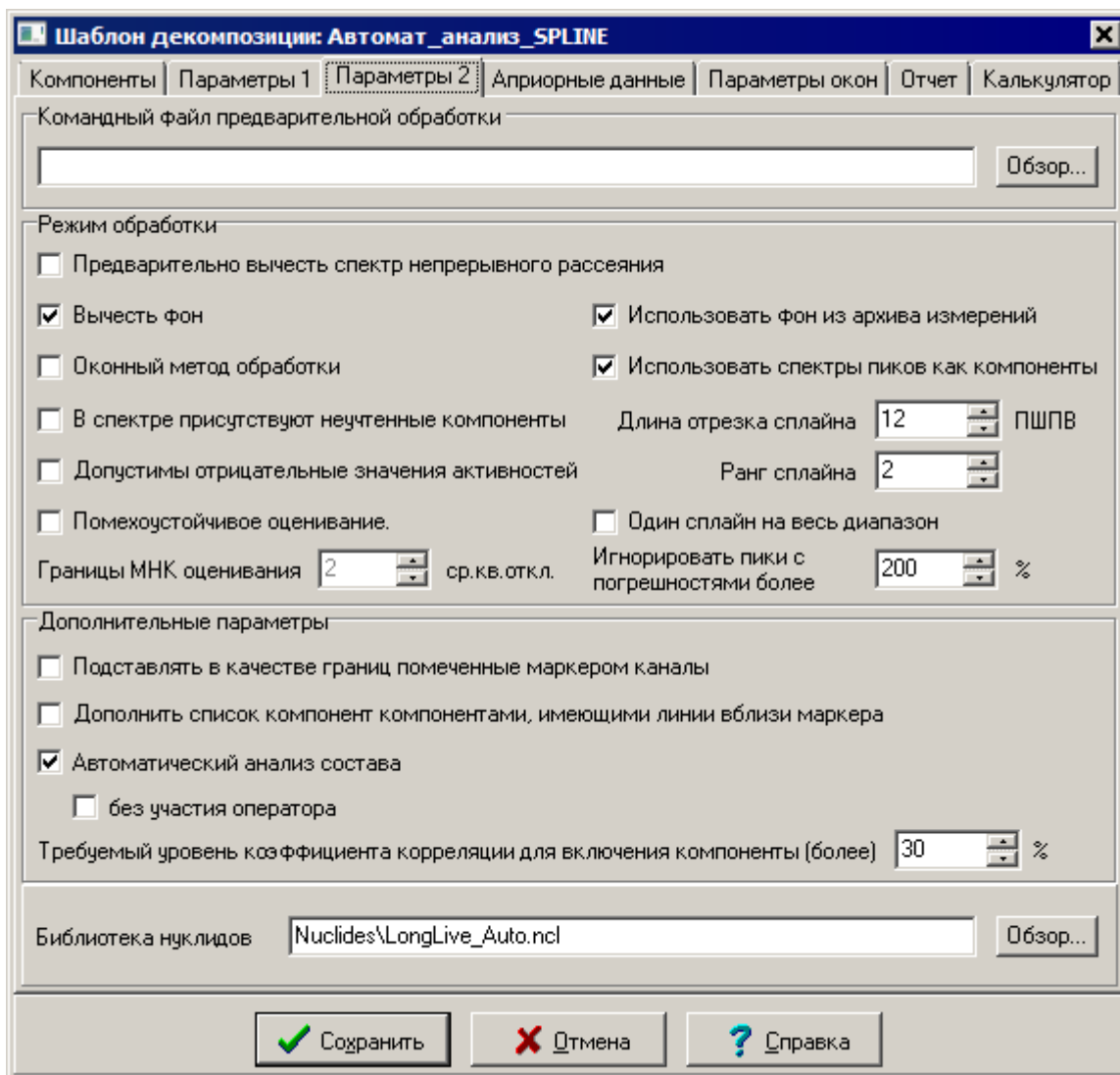
Область применения: измерение значений активности радионуклидов в счетном образце. Счетный образец может быть приготовлен как из нативного материала, так и с применением методов физического концентрирования (озоление, выпаривание, высушивание и т.п.).

Геометрия измерений: - одна из аттестованных геометрий измерений.

Предполагаемый состав гамма излучающих радионуклидов в счетном образце: определяется используемой таблицей нуклидов.

Энергетический интервал: в зависимости от настройки спектрометра. Для

коаксиальных германиевых детекторов обычно 30 - 1800 кэВ.



Шаблон «Автоматический_анализ_SPLINE» отличается от шаблона «Автоматический_анализ», тем, что поиск пиков в спектре не производится и спектр непрерывного рассеяния из спектра счётного образца предварительно не вычитается, а спектр непрерывного рассеяния аппроксимируется сплайном. В этом случае оценивание остаётся в основном в рамках линейной модели и, соответственно, оценки и активностей и неопределённостей будут наиболее корректными. Энергетические окна обработки формируются из линий нуклидов подозреваемых в формировании спектра. Список «подозреваемых» нуклидов формируется на основе анализа коэффициентов корреляции спектров нуклидов со спектром пробы (обычный подход в методах распознавания образов).

Оператор может задать режим «Один сплайн на весь диапазон». При этом за счёт сшивки отрезков сплайна может увеличиться обусловленность матрицы системы уравнений, но в том случае, если «ненужных» отрезков сплайна (отрезки сплайна будут «ненужными», если над ними нет пиков спектра) будет много, обусловленность систему уменьшится за счёт «лишних» неизвестных коэффициентов сплайна. Поэтому режим «Один сплайн на весь диапазон» выгоден для сложных спектров.

Если режим «Один сплайн на весь диапазон» не установлен, оператор может задать, какие участки спектра процедура будет считать чистыми от пиков, указав погрешность пиков, которые она будет игнорировать – поле «Игнорировать пики с погрешностями более

ppp %». Сплайн будет рваться на таких участках.

3. "Равновесный_U-Ra"

Область применения: измерение значений активности Cs-137, Cs-134 и естественных радионуклидов в счетном образце. Счетный образец может быть приготовлен как из нативного материала, так и с применением методов физического концентрирования (озоление, выпаривание, высушивание и т.п.).

Геометрия измерений: - одна из аттестованных геометрий измерений.

Предполагаемый состав гамма излучающих радионуклидов в счетном образце: Cs-137, Cs-134, U-nat, Rn-222, Th-232.

Энергетический интервал: 40 - 1800 кэВ.

В природе уран состоит из изотопов находящихся между собой в определённой пропорции¹¹ и в грунтах Ra-226 нередко находится в равновесии с U-238. Это используется в данном шаблоне. Поскольку очень трудно разделить линию 185.72 кэВ U-235 и 186.21 Ra-226, а определять активность U-235 по слабым «мягким» линиям на коаксиальном ППД детекторе трудно, используется известное соотношение вкладов Ra-226 и U-235 в суммарный пик 186 кэВ.

В используемой таблице нуклидов **U-nat-Eq** нуклиды объединены в следующие равновесные цепочки:

Нуклид	Синоним	↓ Вес	Полураспад	Гамма-эк	Атрибуты
Pu-237	Pu-237	237	45.3 дн.	0	0
U-nat	U-238+U-235	237.978	4.468e+09 лет	0	0P
Pu-238	Pu-238	238	87.75 лет	0	0

Имя нуклида	Нуклид-эмитент	↓ Энергия гл	Квантовый выход	Атрибуты
U-nat	Fr-223	184.8	0.000173205	
U-nat	U-235	185.72	2.37561	%
U-nat	Ra-234	186	0.00312041	
U-nat	Ra-226	186.21	3.1357	%

Нуклидов: 125 Гамма линий: 365, выбранных: 2 Суммарный квантовый выход: 5.51131 % Суммарный энергет

И

¹¹ Есть одно исключение. В Южной Африке существует так называемый «природный урановый котёл» - месторождение урана с нарушенной пропорцией изотопов урана.

В итоге мы имеем следующий набор компонент декомпозиции:

Шаблон декомпозиции: Равновесные_U-Ra

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Основные:	Дополнительные:	Включенные в отчет:
<input type="checkbox"/> Eu-152	<input type="checkbox"/> Tc-99 <input type="checkbox"/> Tc-99m <input type="checkbox"/> Te-121 <input type="checkbox"/> Te-121m <input type="checkbox"/> Te-123 <input type="checkbox"/> Te-123m <input type="checkbox"/> Te-127m <input type="checkbox"/> Te-129m <input type="checkbox"/> Th-229 <input checked="" type="checkbox"/> Th-232 <input type="checkbox"/> Ti-44 <input type="checkbox"/> Tl-204 <input type="checkbox"/> Tm-168 <input type="checkbox"/> U-233 <input type="checkbox"/> U-234 <input type="checkbox"/> U-235 <input type="checkbox"/> U-236 <input checked="" type="checkbox"/> U-nat \Ra-226(U-nat) <input type="checkbox"/> W-181 <input type="checkbox"/> W-185	<input checked="" type="checkbox"/> Cs-134 <input checked="" type="checkbox"/> Cs-137 <input checked="" type="checkbox"/> K-40 <input checked="" type="checkbox"/> Rn-222 <input checked="" type="checkbox"/> Th-232 <input checked="" type="checkbox"/> U-nat \Ra-226(U-nat) <input type="checkbox"/> Суммарная

Включить компоненты рентгеновской флуоресценции

Вычислить суммарную активность по нуклиду

Остальные параметры шаблона идентичны шаблону "Автоматический_анализ" за исключением требования автоматического определения состава и используемой таблицы нуклидов:

3. "Неравновесные_ЕРН"

Область применения: измерение значений активности Cs-137, Cs-134 и естественных радионуклидов в счетном образце. Счетный образец может быть приготовлен как из нативного материала, так и с применением методов физического концентрирования (озоление, выпаривание, высушивание и т.п.).

Геометрия измерений: - одна из аттестованных геометрий измерений.

Предполагаемый состав гамма излучающих радионуклидов в счетном образце: Cs-137, Cs-134, U-nat, Ra-226, Rn-222, Th-232, Th-228.

Энергетический интервал: 40 - 1800 кэВ.

Отличие от шаблона "Равновесный_U-Ra" в том, что в данном случае мы не предполагаем равновесия между U-238 и Ra-226, что, к сожалению, весьма нередко встречается в природе, и поэтому, для вычисления вклада U-235 в суммарный пик 186 кэВ, вынуждены определять активность урана по «мягким» линиям. В итоге существенно увеличивается погрешность оценки Ra-226, что является платой за отказ в таких априорных сведениях. Соответственно, отличие только в списке определяемых нуклидов и используемой таблице нуклидов.

Шаблон декомпозиции: Неравновесные_ЕРН

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Основные:	Дополнительные:	Включенные в отчет:
	<input type="checkbox"/> Pb-210 <input type="checkbox"/> Pm-143 <input type="checkbox"/> Pm-144 <input type="checkbox"/> Pm-145 <input type="checkbox"/> Pm-146 <input type="checkbox"/> Pm-147 <input type="checkbox"/> Pm-148 <input type="checkbox"/> Pm-148m <input type="checkbox"/> Po-209 <input type="checkbox"/> Po-213 <input type="checkbox"/> Pr-143 <input type="checkbox"/> Pt \Pt-x <input type="checkbox"/> Pu-237 <input type="checkbox"/> Pu-238 <input type="checkbox"/> Pu-239 <input type="checkbox"/> Pu-240 <input type="checkbox"/> Pu-241 <input type="checkbox"/> Ra-225 <input checked="" type="checkbox"/> Ra-226 <input type="checkbox"/> Ra-226v \Ra-226-Po-210	<input checked="" type="checkbox"/> Cs-134 <input checked="" type="checkbox"/> Cs-137 <input checked="" type="checkbox"/> K-40 <input checked="" type="checkbox"/> Ra-226 <input checked="" type="checkbox"/> Rn-222 <input checked="" type="checkbox"/> Th-228 <input checked="" type="checkbox"/> Th-232 <input checked="" type="checkbox"/> U-nat

Включить компоненты рентгеновской флуоресценции

Вычислить суммарную активность по нуклиду

Шаблон декомпозиции: Неравновесные_ЕРН

Компоненты | Параметры 1 | **Параметры 2** | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Командный файл предварительной обработки

Режим обработки

Предварительно вычесть спектр непрерывного рассеяния

Вычесть фон Использовать фон из архива измерений

Оконный метод обработки Использовать спектры пиков как компоненты

В спектре присутствуют неучтенные компоненты Длина отрезка сплайна ПШПВ

Допустимы отрицательные значения активностей Ранг сплайна

Помехоустойчивое оценивание. Один сплайн на весь диапазон

Границы МНК оценивания ср.кв.откл. Игнорировать пики с погрешностями более %

Дополнительные параметры

Подставлять в качестве границ помеченные маркером каналы

Дополнить список компонент компонентами, имеющими линии вблизи маркера

Автоматический анализ состава

без участия оператора

Требуемый уровень коэффициента корреляции для включения компоненты (более) %

Библиотека нуклидов Обзор...

Сохранить Отмена Справка

Используемая в данном шаблоне таблица нуклидов имеет следующую структуру цепочек:

The screenshot shows the SpectrRad software interface. The main window is titled "SpectrRad - Таблица нуклидов". It contains two tables and a diagram.

Table 1: Nuclides (LongLive.ncl)

Нуклид	Синоним	Вес	Полураспад	Элемент	Распространенность
U-236	U-236	236.046	2.342e+07 лн U	U	0
U-238	U-238	238.051	4.468e+09 лн U	U	99.2742
U-nat	U-nat	238.029	4.468e+09 лн U	U	100
W	W-x	183.85	Стаб.	W	100

Table 2: Nuclides (LongLive.gml)

Имя нуклид	Нуклид-эми	Энергия	Погрешност	Квантовый	Погрешност	Кэффи
U-nat	Th-227	6.5	0	0.00395665	0	41.2
U-nat	Th-227	8.15	0	0.000351703	0	0
U-nat	Th-231	9.2	0	0.00147106	0	0
U-nat	Ac-227	9.3	0	4.90358e-06	0	326000
U-nat	Ra-223	10	0	0.000619634	0	1047
U-nat	Th-231	10.25	0	0.0022378	0	0
U-nat	Tl-207	10.6	0	9.02436e-05	0	0
U-nat	Po-211	10.6	0	9.59675e-07	0	0

Diagram: Schema of U-nat decay

```

    graph TD
      U_nat[U-nat] --> Ra_226[Ra-226 (95.5422%)]
      U_nat --> Rn_222[Rn-222]
      Rn_222 --> Pb_210_1[Pb-210 (99.959%)]
      Rn_222 --> Pb_210_2[Pb-210 (0.0209958%)]
      Rn_222 --> Pb_210_3[Pb-210 (0.0199758%)]
      Rn_222 --> Pb_210_4[Pb-210 (4.1958e-06%)]
      Rn_222 --> Pb_210_5[Pb-210 (2e-05%)]
  
```

Summary statistics at the bottom: Нуклидов: 179 | Гамма линий: 1012 | Квантовый выход линии: 0.00395665 % | Энергетический выход линии: 0.000257183 (кэВ) / 4.

4. "ВФУ_автомат"

Область применения: измерение значений активности радионуклидов в атмосферном воздухе после атомной аварии или ядерного взрыва. Счётным образцом является материал фильтра после протяжки через него воздуха. Счетный образец может быть приготовлен как из нативного материала фильтра, так и с применением методов физического концентрирования (озоление).

Геометрия измерений: - одна из аттестованных геометрий измерений.

Предполагаемый состав гамма излучающих радионуклидов в счетном образце: список ДВЗЯИ, естественно радиоактивные нуклиды. Всего 180 нуклидов.

Сведения о счетном образце, используемые программой:

- производительность воздуходувки (P) куб.м/час;
- длительность протяжки воздуха через фильтр (t) часов;
- коэффициент улавливания для фильтра (K).

Формула для расчета удельной активности нуклидов в атмосферном воздухе:

$$A_0 = \frac{A(t) \cdot \lambda}{P \cdot K \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t))}$$

Здесь: $A(t)$ - активность нуклида на фильтре на момент окончания протяжки (Бк), t - длительность протяжки (час), λ - постоянная распада нуклида (час^{-1}), A_0 - активность нуклида в воздухе (Бк/куб.м).

Энергетический интервал: 40 - 3000 кэВ.

Шаблон декомпозиции: ВФУ_автомат

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Основные:	Дополнительные:	Включенные в отчет:
	<input type="checkbox"/> Ac-225 <input type="checkbox"/> Ag-106m <input type="checkbox"/> Ag-108m <input type="checkbox"/> Ag-110m <input type="checkbox"/> Al-26 <input type="checkbox"/> Am-241 <input type="checkbox"/> Am-243 <input type="checkbox"/> As-73 <input type="checkbox"/> As-74 <input type="checkbox"/> At-217 <input type="checkbox"/> Au \Au-x <input type="checkbox"/> Au-195 <input type="checkbox"/> Ba-133 <input type="checkbox"/> Ba-140 <input checked="" type="checkbox"/> Be-7 <input type="checkbox"/> Bi \Bi-x <input type="checkbox"/> Bi-206 <input type="checkbox"/> Bi-209 <input type="checkbox"/> Bi-212 <input type="checkbox"/> Bi-213	<input checked="" type="checkbox"/> Be-7 <input checked="" type="checkbox"/> Cs-134 <input checked="" type="checkbox"/> Cs-137 <input checked="" type="checkbox"/> I-131

Включить компоненты рентгеновской флуоресценции

Вычислить суммарную активность по нуклиду
 Учитывать энергию излучения

Компоненты разложения спектра.

Шаблон декомпозиции: ВФУ_автомат

Компоненты | **Параметры 1** | Параметры 2 | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Общие параметры

Границы обработки, кэВ: 40 - 3000 []

Допустимая невязка: 2

Допустимый энергетический дрейф (%): 2 / 100 (текущий/общий)

Допустимый дрейф разрешения (%): 100

Дополнительная погрешность (%): 10

Корректировать энергетическую калибровку спектра по результатам обработки

Глобальный поиск решения

Варьирование усиления Варьирование нуля шкалы Варьирование разрешения

Диапазон: 10 % Диапазон: 0 % Диапазон: 0 %

Число точек: 50 Число точек: 3 Число точек: 3

Варьирование Z эффективное пробы Варьирование толщины пробы

Уточнение решения методом Гаусса-Ньютона

Дрейф коэффициента усиления Дрейф нуля энергетической шкалы

Дрейф разрешения спектрометра Независимый дрейф компонент

Учёт нелинейных искажений дрейфа энергетической калибровки

Число итераций: 100

Коэффициент демпфирования: 8 %

Шаблон декомпозиции: ВФУ_автомат

Компоненты | Параметры 1 | **Параметры 2** | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Командный файл предварительной обработки

Режим обработки

Предварительно вычесть спектр непрерывного рассеяния

Вычесть фон Использовать фон из архива измерений

Оконный метод обработки Использовать спектры пиков как компоненты

В спектре присутствуют неучтенные компоненты Длина отрезка слайна ПШПВ

Допустимы отрицательные значения активностей Ранг слайна

Помехоустойчивое оценивание. Один слайн на весь диапазон

Границы МНК оценивания ср.кв.откл. Игнорировать пики с погрешностями более %

Дополнительные параметры

Подставлять в качестве границ помеченные маркером каналы

Дополнить список компонент компонентами, имеющими линии вблизи маркера

Автоматический анализ состава

без участия оператора

Требуемый уровень коэффициента корреляции для включения компоненты (более) %

Библиотека нуклидов Обзор...

Сохранить Отмена Справка

Параметры декомпозиции.

Расчёт активностей нуклидов в воздухе реализуется в программируемом калькуляторе:

```

i; k;ka;vol;d;nucl;act;err;s;e1;tcool;dc;expd;expc;
{
  ka=1; // Эффективность фильтра
  d = abs(Dsample-Dexpose); //Число дней прокачки
  tcool = (Dact-Dsample); // Время распада (дней)
  s= Size*24; // Кол-во прокачанного воздуха за день куб.м
  if (s <= 0)
  {
    s=input("Мощность ВФУ (куб м/час)");
    s = s*24; // Количество прокач. воздуха за день
  }
  k=s*ka; // производительность 100000 - коэффциент для удобства представления
  vol = k*d; // Объём прокачанного воздуха
  Print("\r\n\r\nМощность ВФУ (куб.м/час): %s, длительность фильтрации (часов): %s", Size, d*24);
  Print("\r\nОбъём фильтрованного воздуха (куб.м): %s\r\n", vol);
  Print("\r\nАктивность нуклидов в воздухе (мкБк/куб. м):");
  k= k/1000000.; // 100000 - коэффциент для удобства представления (мкБк)
  vol = vol/1000000;
  i = 1;
  while (i <= nNucl)
  {
    if (!sVisible(i))
    {
      err = iErr(i);
      if (err > 0)
      {
        nucl = iNucl(i);
        act = iAct(i);
        if (act < 0)
          act = 0;
        dc = (24*3600*0.69314718)/iHalfLife(i); // постоянная распада
        expc = exp(-dc*tcool);
        expd = exp(-dc*d);
        if (expd > 0.99)
        {
          act = act/(expc*vol);
          err = err/(expc*vol);
          e1 = VRound*err;
          err= fround(err, e1);
          act= fround(act, e1);
        }
        else
        {
          act = act*dc/(expc*k*(1.-expd));
          err=err*dc/(expc*k*(1.-expd));
          e1 = VRound*err;
          err= fround(err, e1);
          act= fround(act, e1);
        }
        Print("\r\n %c\t%s +/- %s", nucl, act,err);
      }
    }
    i = i+1;
  }
}
  
```

Ф

Сп

Шаблон отчёта «Общий»

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения
«Центр гигиены и эпидемиологии в Московской области»
Аккредитованный испытательный лабораторный центр (АИЛЦ)
 Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.510107 от 26.03.2013 до 26.03.2018

141014, Московская область, г.Мытищи, ул.Семашко, д.2. Телефон: 586-12-11 Факс: 586-43-24. E-mail: centr@mosoblises.ru
 ИНН 5029081629 ОГРН 1055005109147

Протокол лабораторных исследований
№ {Sample} от {Date}г.

{Sample}
 {lbSample}

{SampleCode}
 {lbSampleCode}

{Programm}

Шаблон обработки: {DecTemplate}

Таблица нуклидов: {NuclidesTable}

{lbSampleNote}: {SampleNote}

{lbSampleType}: {SampleType}

{lbSampleArea}: {SampleArea}

{lbProducer}: {Producer}

{lbProductionDate}: {ProductionDate}

{lbDeclarant}: {Declarant}

{lbComment}: {Comment}

{lbDeliveryDate}: {DeliveryDate}

{lbSampleDate}: **{SampleDate}**

Дата измерения: **{MeasDate}**

Нормативная документация: МИА гамма, бета «СПЕКТР» № 40090.0Ж562 от 25.06.2010

Средство измерения	
Наименование средства измерения	Свидетельство о поверке
{Analyser}	{Info}

Результаты исследований				
№.№	Нуклид	Активность {AUnit}	Максимальное значение	Величина допустимого уровня
<<{SN}	{Nucl}	{Act&Err}	~<{SAct}+{SErr}>~	{Norm1}
>>	Эфф. Активность	{AEff&Err}	~<{SAeff}+{SAeffEr r}>~	{Norm1[Ra-226]}

Ответственный

за оформление протокола

врач-лаборант
 должность

{Operator}
 Ф.И.О.

 подпись

Шаблон отчёта «Продукты»

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения
«Центр гигиены и эпидемиологии в Московской области»
Аккредитованный испытательный лабораторный центр (АИЛЦ)
Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.510107 от 26.03.2013 до 26.03.2018

141014, Московская область, г.Мытищи, ул.Семашко, д.2. Телефон: 586-12-11 Факс: 586-43-24. E-mail: centr@mosoblises.ru
ИНН 5029081629 ОГРН 1055005109147

Протокол лабораторных исследований № {Sample} от {Date}г.

{Sample}
{lbSample}

{SampleCode}
{lbSampleCode}

Наименование пробы (образца): {SampleNote}

Тип пробы: {SampleType}

Дата отбора (доставки): {SampleDate}

Дата измерения: {MeasDate}

Нормативная документация: МУК 2.6.1.1194-03 «Радиационный контроль. Стронций-90 и цезий-137. Пищевые продукты». ТР ТС 021/2011, прил.4

Дополнительные сведения: Нет

Средство измерения	
Наименование средства измерения	Свидетельство о поверке
{Analyser}	{Info}

Результаты исследований						
№ п/п	Удельная активность радионуклида.	Результаты исследований	Неопределённость измерения	Гигиенический норматив	Единица измерения	НД на методы исследования
1	¹³⁷ Cs	{Activ[Cs-137]}	{AbsErr[Cs-137]}	{Norm1[Cs-137]}	{AUnit}	МИА гамма, бета «СПЕКТР» № 40090.0Ж562 от 25.06.2010.
2	⁹⁰ Sr	{Activ[Sr-90]}	{AbsErr[Sr-90]}	{Norm1[Sr-90]}	{AUnit}	

{Calculator}

Исполнитель

{Operator}

МЕТОДИКА ПОВЕРКИ СПЕКТРОМЕТРОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА СПЕКТРРАД

Настоящая методика поверки распространяется на спектрометры альфа, бета и гамма излучения с любыми типами детекторов, работающие под управлением программных пакетов «SpectrRad» версии 16 и выше.

Первичная поверка проводится при установке программного пакета «СПЕКТРРАД» на спектрометр и после ремонта спектрометра, периодическая – в процессе эксплуатации.

В соответствии с установленным Госстандартом России порядке (ПР 50.2.006-94) межповерочный интервал устанавливается при утверждении типа средства измерения и должен быть указан в паспорте спектрометра. В том случае если межповерочный интервал не определен, он устанавливается равным 2 годам.

Поверка должна осуществляться органами государственной метрологической службы Госстандарта России или метрологическими службами юридических лиц, аккредитованных в установленном порядке на право проведения государственной поверки спектрометрических средств измерений. Поверка спектрометра для работы под управлением программного пакета «СПЕКТРРАД» оформляется свидетельством о поверке (метрологической аттестации).

1. Перечень аттестуемых параметров

При поверке оцениваются те метрологические характеристики средства измерения (СИ) указанные в свидетельстве о калибровке, которые могут измениться в процессе эксплуатации. Для любого средства измерения в соответствии с действующим ГОСТ 8.009-84 два параметра требуют оценки в обязательном порядке: систематическая составляющая погрешности измерений и случайная составляющая погрешности средства измерения. Дополнительные метрологические характеристики зависят от типа СИ и определяются разработчиком методики. В нашем случае рекомендуется оценка и подтверждение, что они находятся в допустимом диапазоне, следующих метрологических характеристик:

- Значения систематической составляющей погрешности измерений (смещение оценок) для всех аттестованных геометрий.
- Соответствие оценки статистической неопределённости рассчитываемой программой реальной величине статистической неопределённости рассчитанной по выборке (запас точности).
- Дифференциальная нелинейность спектрометра.
- Общая невязка декомпозиции спектров контрольных источников.
- Дрейф коэффициента преобразования, используемый энергетический диапазон.
- Энергетическое разрешение спектрометра¹².
- Интегральное значение интенсивности фона в используемом энергетическом диапазоне и коэффициент изменчивости фона.
- Значения нижнего предела диапазона измерений определяемых нуклидов для каждой из используемых геометрий.

В пакете документов о метрологической аттестации (периодической или первичной поверке) рекомендуется приводить все аттестованные метрологические характеристики спектрометра в виде отдельного приложения к свидетельству о поверке.

2. Операции поверки

При проведении поверки должны быть выполнены операции указанные в таблице 1.

¹² Только для альфа и гамма спектрометров.

Таблица 1.

	Наименование операции		Номер пункта методики	Проведение операции при:	
				первичной поверке	периодической поверке
1	Внешний осмотр		8.1	Да	Да
2	Опробование		8.2	Да	Да
3	Измерения контрольного источника		9.1	Да	Да
4	Статистическая обработка результатов измерения контрольного источника:	Оценка систематической и случайной составляющей погрешности (неопределённости) измерений, невязки декомпозиции дифференциальной нелинейности спектрометра	9.2.1	Да	Да
		Оценка дрейфа коэффициента преобразования энергии в канал, дрейфа нуля шкалы каналов, используемого энергетического диапазона,	9.2.2	Да	Да
		Оценка энергетического разрешения спектрометра ¹³	9.2.3	Да	Да
5	Измерения фона		9.3	Да	Да
6	Статистическая обработка результатов измерения фона	Определение интегрального значения интенсивности фона в используемом энергетическом диапазоне и коэффициента изменчивости фона	9.3.1	Да	Да
		Определение нижнего предела диапазона измерений активности нуклидов	9.3.1, 9.3.2	Да	Да

¹³ Для альфа и гамма спектрометров

3. Средства поверки

При проведении поверки должны быть применены средства, указанные в таблице 2. Допускается использование аналогичных средств измерений и контрольных источников (эталонных мер активности), метрологические параметры и характеристики которых не уступают указанным в таблице 2. Средства поверки должны иметь действующие свидетельства об их государственной поверке (аттестации).

Таблица 2.

	Средство поверки	Технические характеристики	Тип спектрометра
1	Контрольный источник (эталонная мера активности), включающая смесь радионуклидов Am-241+Cs-137+Eu-152	В виде гранул, размер гранул не более 3 мм. Плотность 1.5 ± 0.5 г/см ³ Удельная активность (Бк/кг): Am-241 от 0 до 10000 Cs-137 от 0 до 10000 Eu-152 от 500 до 10000 Погрешность ± 5 %	Гамма «ППД спектрометр» с рабочим диапазоном энергий от 30 до 2000 кэВ.
2	Контрольный источник, включающая смесь радионуклидов Cs-137+K-40+Ra-226+Th-232	В виде гранул, размер гранул не более 3 мм. Плотность 1.5 ± 0.5 г/см ³ Удельная активность (Бк/кг): Cs-137 от 0 до 5000 K-40 от 0 до 16000 Ra-226 от 0 до 5000 Th-232 от 0 до 5000 Погрешность ± 5 %	Гамма «сцинтиляционный спектрометр» с рабочим диапазоном энергий от 100 до 3000 кэВ.
3	Контрольный источник, включающая смесь радионуклидов Sr-90+Y-90 в равновесии	В виде гранул, размер гранул не более 1 мм. Плотность 1.5 ± 0.5 г/см ³ Удельная активность (Бк/кг): Sr-90 от 1000 до 100000 Погрешность ± 5 %	Бета спектрометр с рабочим диапазоном энергий от 100 до 3000 кэВ
4	Контрольный источник, включающая смесь радионуклидов Pu-238+Pu-240+Pu-242	В виде металлического диска с пятном осаждённых радионуклидов. Активность плутониев от 0 до 50 Бк. Суммарная активность не менее 20 Бк. Погрешность ± 5 %	Альфа спектрометр с рабочим диапазоном энергий от 2000 до 7000 кэВ
5	Лабораторные весы ВМ 2202	Диапазон 0.5-2200 г. Погрешность измерения ± 0.01 г	Все типы

Активность эталонов не должна вызывать перегрузки¹⁴ спектрометра и в то же время быть достаточной для набора в течение часа не менее 10 импульсов на канал в

¹⁴ **Перегрузка** - интенсивность регистрируемых спектрометром импульсов, при которых начинают изменяться параметры спектрометрического тракта (нуль шкалы, коэффициент усиления, разрешение и т.п.)

энергетическом диапазоне являющимся пересечением области значений¹⁵ спектра нуклида и рабочего диапазона спектрометра. Значение нижнего порога активности нуклида в таблице 2 равно нулю означает, что данный нуклид в эталоне может отсутствовать. Для спектрометров использующих другой рабочий диапазон энергий должны использоваться эталоны, имеющие линии излучения покрывающие не менее 50 % рабочего диапазона.

Для измерения спектра фона в спектрометре используется "фоновая проба", которую можно считать одним из эталонов - образцовой мерой нулевой активности.

4. Требование к квалификации поверителей

К проведению измерений и обработке результатов измерений допускаются лица, имеющие профессиональные знания в области спектрометрии и изучившие руководство по эксплуатации спектрометра, руководство пользователя программного пакета «СПЕКТРРАД» и настоящую методику.

5. Требование к технике безопасности

При проведении поверки должны быть соблюдены требования безопасности следующих документов:

1. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010.
3. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей.

К работе должны привлекаться только сотрудники, имеющие допуск к работе с источниками ионизирующих излучений.

6. Условия поверки

Условия проведения измерений при поверке должны соответствовать требованиям, предъявляемым к проведению рабочих измерений на радиометре (спектрометре).

7. Подготовка к поверке

При проведении поверки должны быть выполнены следующие подготовительные работы:

- проверка комплектности спектрометра и документации на него;
- проверка комплектности средств поверки и действующих свидетельств на них;
- проверка наличия свидетельства о первичной поверке, при проведении периодической.

8. Проведение поверки спектрометра

- При проведении поверки должны быть выполнены следующие операции:
- внешний осмотр согласно п. 8.1;
- опробование согласно п. 8.2;
- определение метрологических параметров согласно п. 9.

8.1. Внешний осмотр

При проведении внешнего осмотра должно быть установлено:

- наличие маркировок и исправных пломб на блоках и устройствах, входящих в состав комплекта спектрометра;
- надёжность закрепления блоков и устройств на штатных местах;

¹⁵ Область значений - энергетический диапазон, в котором значения спектра нуклида статистически значимо отличны от нуля.

- отсутствие механических повреждений и дефектов на блоках и устройствах спектрометра, могущих повлиять на его работоспособность.

8.2. Опробование

При опробовании должны быть проведены следующие операции:

- общее тестирование в соответствии с режимами программного обеспечения;
- тестирование детекторной системы путём проведения измерения входящего в комплект контрольного источника и измерения фона в соответствии с указаниями руководства пользователя (процедуры: «автокалибровка» и «контроль фона» в руководстве пользователя пакета «СПЕКТРРАД»).


9. Определение метрологических характеристик

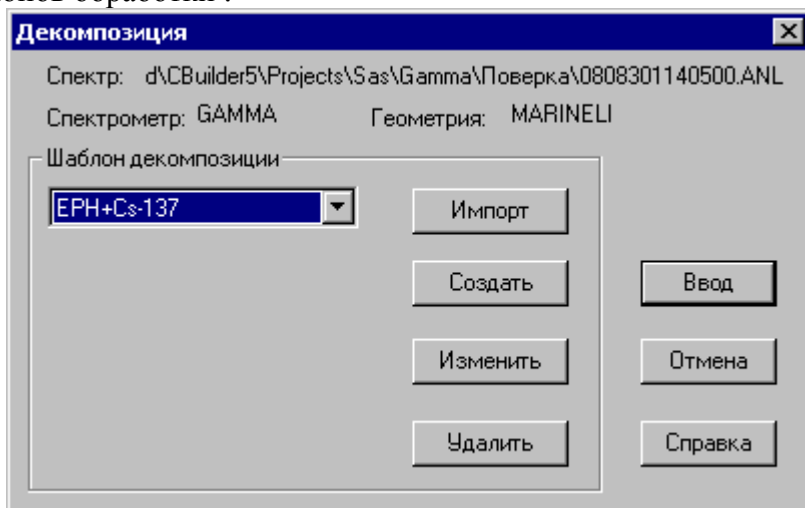
Процедура поверки заключается, прежде всего, в математической оценке, соответствия показаний прибора при измерениях контрольных проб их аттестованным значениям.

В программном пакете «СПЕКТРРАД» необходимые данные для оценки метрологических параметров рассчитываются процедурой обработки спектров и сохраняются в архиве (журнале) измерений. Для оценки всех требуемых метрологических данных требуется провести не менее пяти измерений аттестованного контрольного источника и пяти измерений фона, обработать их по необходимому шаблону обработки и провести статистическую обработку результатов измерений контрольного источника и фона.

Предварительно требуется создать, если его не существует, шаблон, требуемый для обработки спектров при поверке спектрометра.

Стандартный вариант поставки включает необходимый шаблон обработки – шаблон «Поверка». Если в наборе шаблонов нет шаблона «Поверка» его надо создать. Шаблон обработки для поверки создаётся на основе рабочего с небольшими изменениями:

Щелчок по клавише  вызывает форму для выбора, создания и редактирования шаблонов обработки :



Мы выбираем рабочий шаблон обработки и щёлкаем по клавише «Изменить». Появляется форма редактирования шаблона.

The image shows a software dialog box titled "Шаблон декомпозиции: Поверка". It has several tabs: "Компоненты", "Параметры 1", "Параметры 2", "Параметры окон", "Отчет", and "Калькулятор". The "Параметры 1" tab is active. Under the heading "Общие параметры", there are several settings:

- "Границы обработки, кэВ": 200 - 3000
- "Допустимая невязка": 10 (highlighted with a red circle)
- "Допустимый энергетический дрейф": 10 %
- "Допустимый дрейф разрешения": 100 %
- "Дополнительная погрешность": 5 %

At the bottom, there are two checkboxes: "Корректировать дрейф энергетической калибровки спектрометра по результатам обработки" (unchecked) and "Варьирование нуля шкалы" (unchecked).

На странице «Параметры 1» шаблона декомпозиции допустимую невязку требуется установить 10 или более, поскольку нам не требуется коррекция модели при неудаче декомпозиции (мы заранее уверены в корректности модели и оцениваем состояние спектрометра/радиометра).

Шаблон декомпозиции: Поверка

Компоненты | Параметры 1 | **Параметры 2** | Априорные данные | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Командный файл предварительной обработки

Режим обработки

Предварительно вычесть спектр непрерывного рассеяния

Вычесть фон Использовать фон из архива измерений

Оконный метод обработки Использовать спектры пиков как компоненты

В спектре присутствуют неучтенные компоненты Длина отрезка сплайна 3 ПШПВ

Допустимы отрицательные значения активностей Ранг сплайна 4

Помехоустойчивое оценивание. Один сплайн на весь диапазон

Границы МНК оценивания 2 ср.кв.откл. Игнорировать пики с погрешностями более 2000 %

Дополнительные параметры

Подставлять в качестве границ помеченные маркером каналы

Дополнить список компонент компонентами, имеющими линии вблизи маркера

Автоматический анализ состава

без участия оператора

Требуемый уровень коэффициента корреляции для включения компоненты (более) 0 %

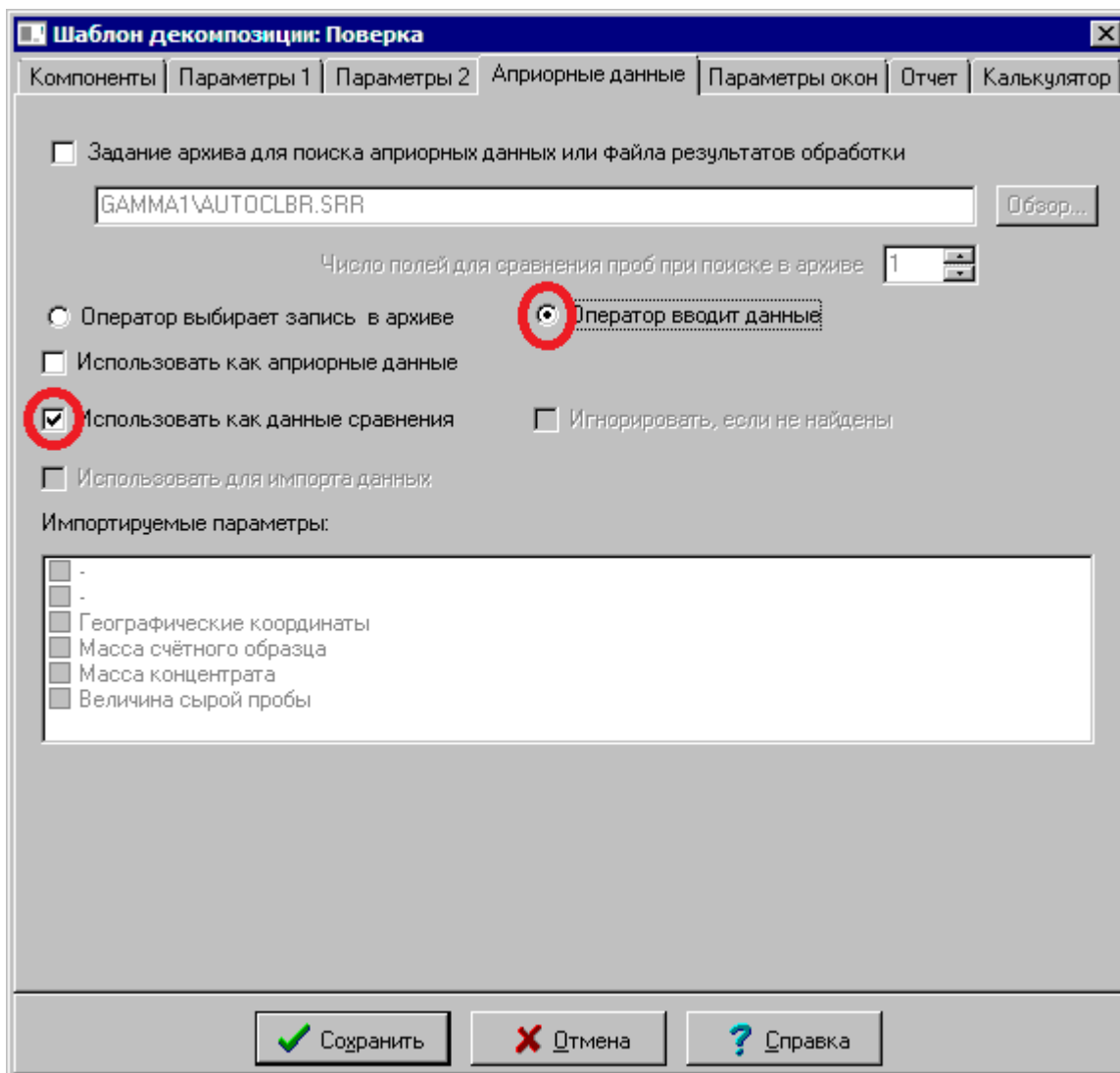
Библиотека нуклидов Nuclides\LongLive.ncl

Сохранить Отмена Справка

На странице «Параметры 2» разрешить отрицательные активности нуклидов и снять галочку в пункте «Помехоустойчивое оценивание». Это необходимо для того, чтобы при поверке спектрометра не подавлялись никакие «плохие» результаты обработки для корректной оценки среднеквадратичного отклонения по выборке¹⁶.

¹⁶ В программном пакете «Спектррад» используется процедура помехоустойчивая оценивания Хуберовского типа (Huber estimation). Отмена процедуры помехоустойчивого оценивания и разрешение отрицательных значений делает оценку МНК оценкой с нормальным характером распределения.

В графе «Априорные данные/Данные сравнения» страницы «Априорные данные» установить галочку «Использовать как данные сравнения». Отметить пункт «Данные вводит оператор».



На странице «Отчёт» установите «галочку» в пункте «Пересчитать на дату отбора» (для контрольного источника дата отбора является датой аттестации) и поскольку результаты декомпозиции нам требуются для статистической обработки, требуется снять «галочку» вывода отчёта на экран и установить «галочку» сохранения в архиве. Выберите пункт «В качестве погрешности величин приводить случайную составляющую погрешности»:

Шаблон декомпозиции: Поверка

Компоненты | Параметры 1 | Параметры 2 | Параметры окон | Отчет | Калькулятор

Параметры отчёта | Содержание

Форматирование текста табуляцией Нормировать на величину пробы

Учитывать распад нуклидов

Пересчитать результаты на дату отбора пробы

Использовать при пересчёте период полураспада материнского нуклида

Пересчитать результаты на коэффициент концентрирования

Рассчитать эфф. активность по сумме нормированных активностей нуклидов

Рассчитать эфф. активность по мощности излучения

Заменять отрицательные значения активностей нулевыми

Приводить верхнюю границу $\max(MDA \text{ или } \text{Акт} + \text{Погр})$ для активностей меньше МДА

В качестве погрешности величин приводить Полную погрешность Случайную составляющую погрешности

Округлить результаты при выводе в отчёт до 10 % от погрешности

Округлять переменные калькулятора

Точность представления результатов цифр


Единица измерения активности Единица измерения мощности

Шаблон отчета

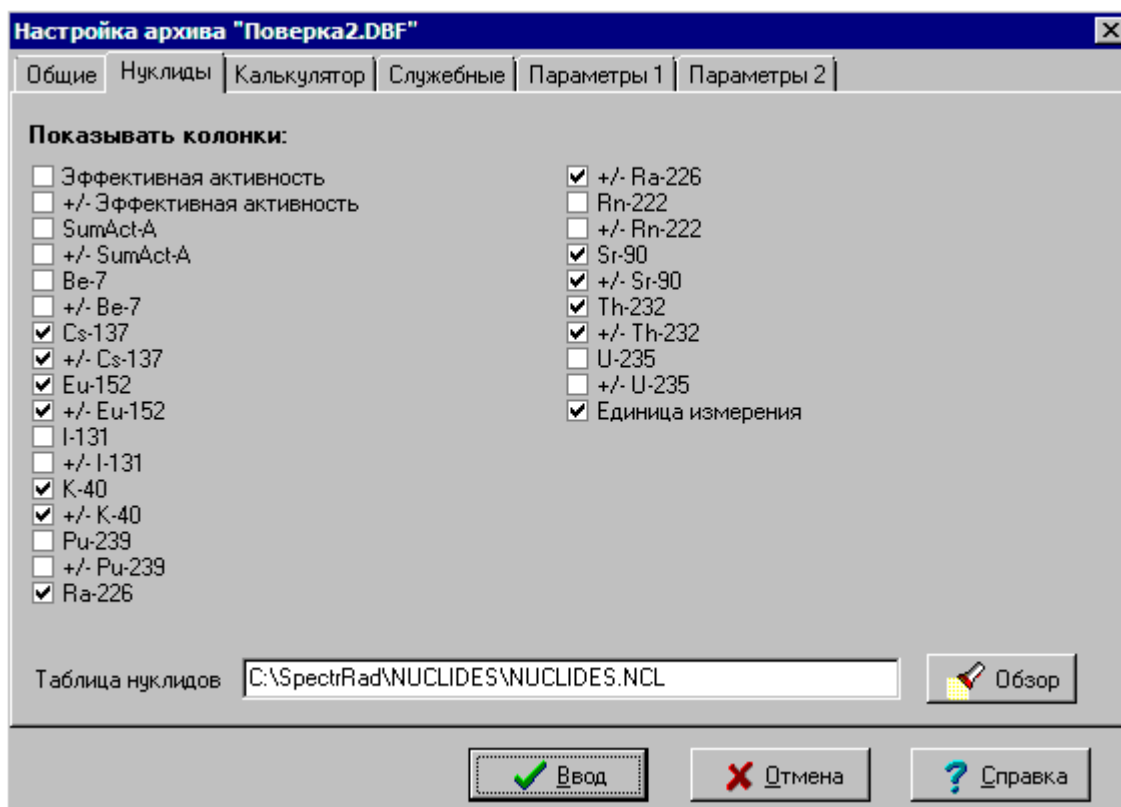
Включить

Вывести отчёт на экран Сохранить отчёт в архиве

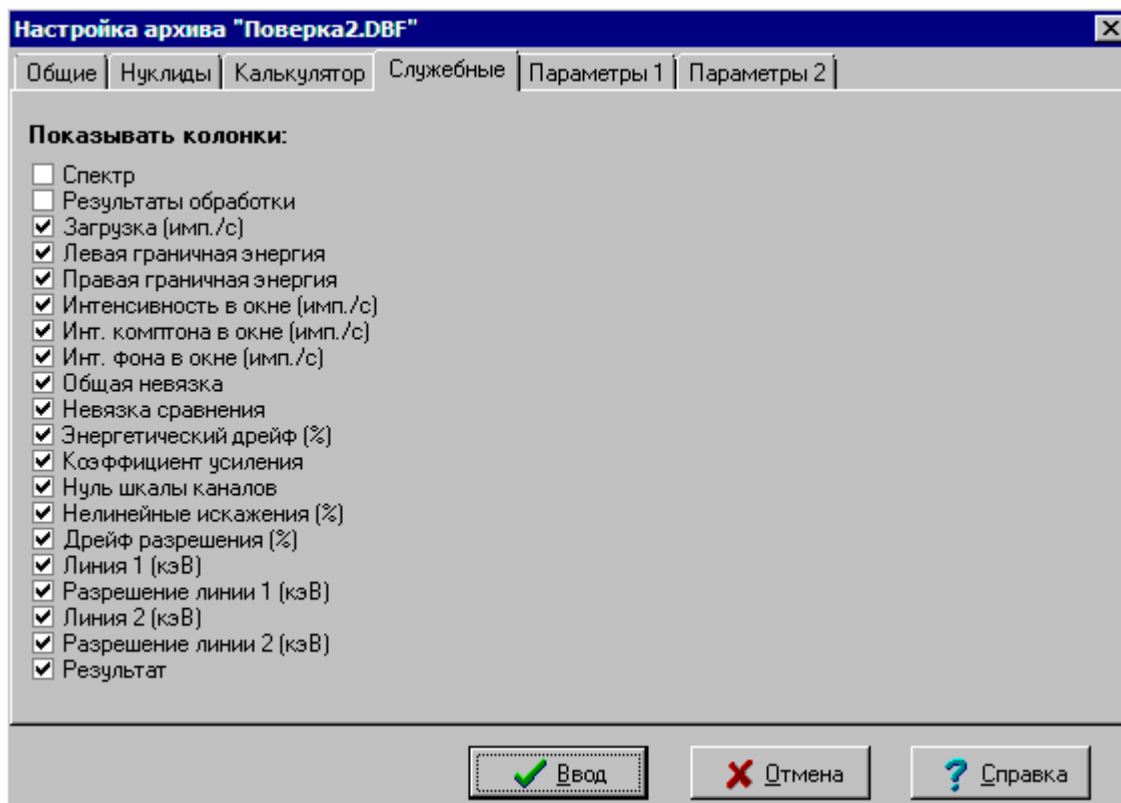
Щёлкнув по клавише «Сохранить» сохраняем шаблон под именем «Поверка» или любым другим отсутствующим в наборе имеющихся шаблонов обработки, чтобы не заменить нашим шаблоном какой-либо рабочий.

Затем для требуемой статистической обработки необходимо настроить журнал измерений, в котором сохраняются результаты измерений контрольного источника и фона. Настройка журнала производится вызовом пункта меню «Сервис / Настройка...» (кнопка «Настройка» ) формы журнала измерений.

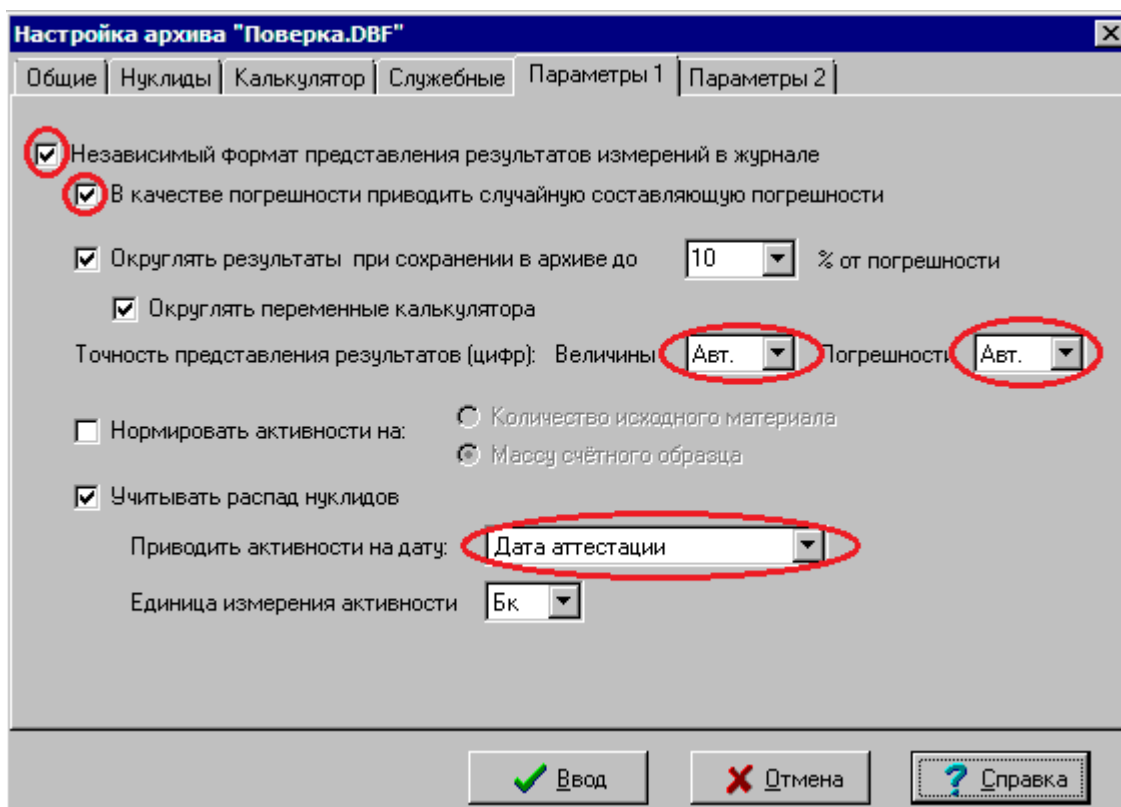
Необходимо установить визуализацию всех нуклидов присутствующих в контрольном источнике и нуклидов, для которых определяется нижний порог детектирования.



Всех служебных параметров (за возможным исключением названий спектров и названий файлов результатов обработки).



На странице «**Параметры 1**» нам необходимо установить следующие флажки и параметры (отмечены красными кружками):



«**Независимый формат представления результатов измерений в журнале**» - необходим для того, чтобы изменять форму представления результатов измерений в журнале, не проводя повторной обработки спектров.

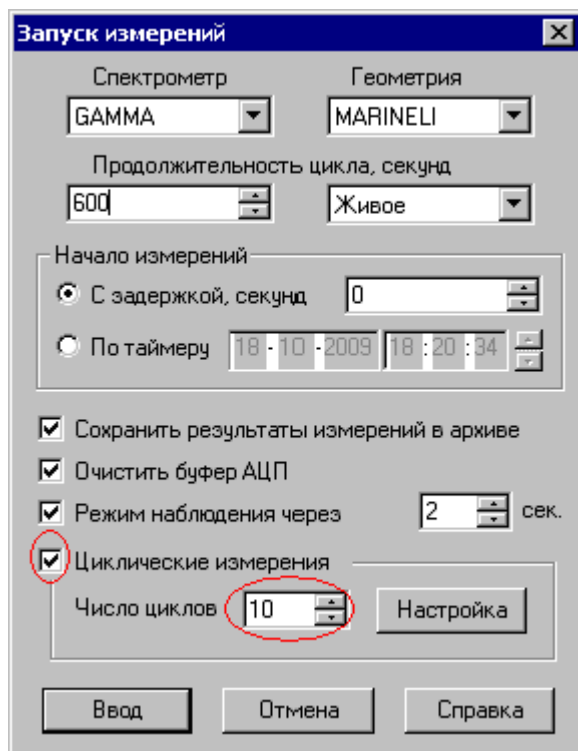
Для сравнения среднеквадратичного отклонения результатов измерений со случайной составляющей погрешности измерений, оцениваемой программой, необходимо в параметрах настройки архива задать режим вывода в колонках погрешностей случайной составляющей погрешности измерений («**В качестве погрешности приводить случайную составляющую погрешности**»). В таком режиме колонки погрешностей в архиве, для наглядности будут выводиться голубым цветом. Нам потребуются обе формы представления погрешностей.

Представление результатов обработки в журнале определяется параметрами округления результатов обработки при сохранении в архиве и точностью представления результатов. Для наиболее корректной оценки статистических параметров не стоит округлять результаты более 10 % от погрешности (пункт «**Округлять результаты при сохранении в архиве до nn % от погрешности**») и установить режим автоматического выбора точности представления результатов.

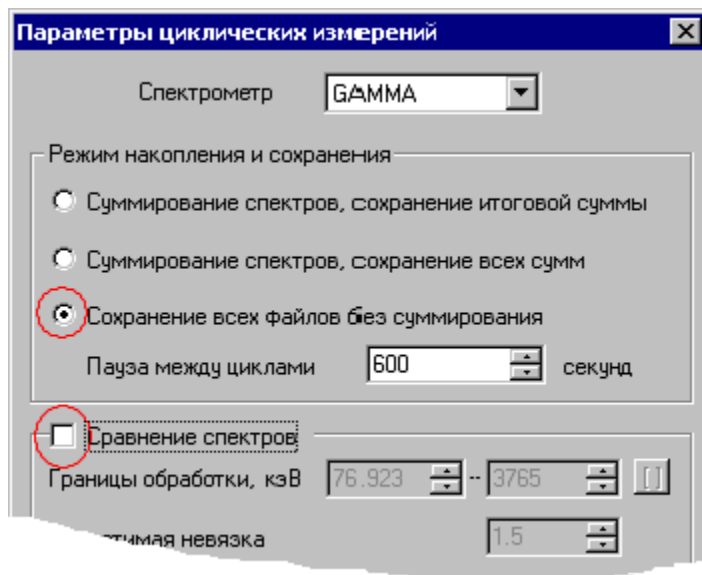
Для статистической обработки результатов измерений контрольного источника необходимо **приводить активности на дату аттестации**.

9.1. Измерения контрольного источника

Для проведения измерений контрольной пробы (источника) можно воспользоваться режимом циклических измерений, например:



Щёлкнув по клавише **Настройка**, требуется установить режим сохранения всех результатов без сравнения спектров:




В качестве шаблона декомпозиции (обработки) спектра необходимо задать режим обработки, включающий все нуклиды, присутствующие в контрольной пробе. Режим обработки спектра можно указать либо в параметрах пробы, например:

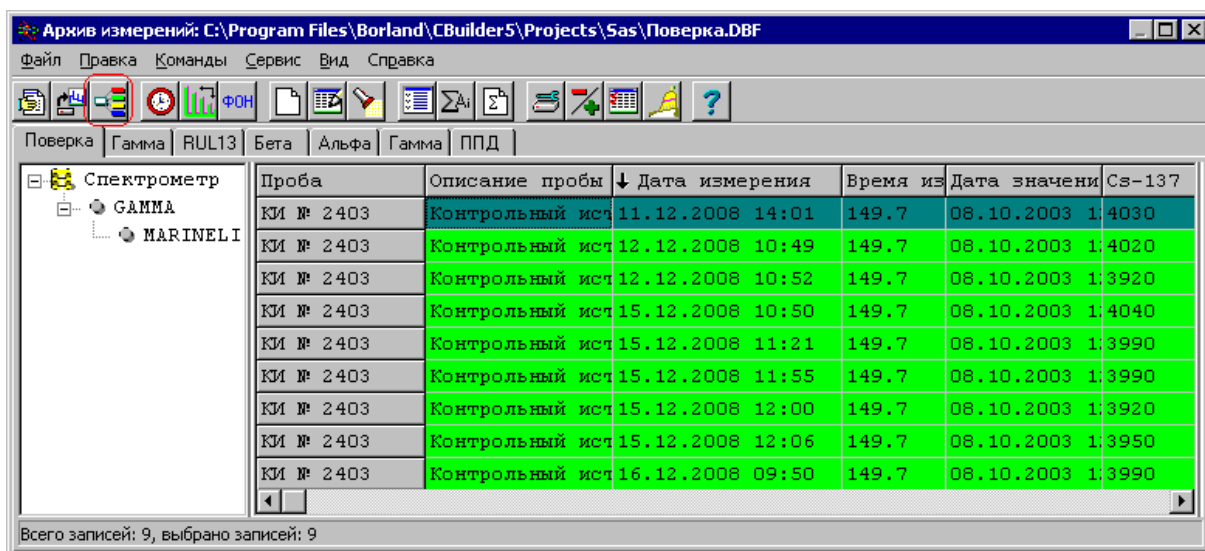
(Шаблон обработки «Поверка» указан как шаблон обработки результата измерений), либо обработать по выбранному шаблону сохранённые в архиве измерений накопленные спектры по окончании измерений.

Если обработка спектра по шаблону «Поверка» задана в процессе циклических измерений, данные об активностях нуклидов в контрольном источнике оператор должен ввести перед началом измерений. Для этого необходимо использовать пункт меню «Файл \ Активность нуклидов...» формы ввода параметров пробы:

Если в качестве контрольного источника при ежедневной поверке спектрометра

используется аттестованная мера активности, то нет необходимости проводить не менее пяти измерений контрольного источника. Достаточно одного. В качестве необходимых дополнительных данных можно использовать данные ежедневной процедуры поверки в том случае, если все они проведены не позднее месяца до даты поверки. При этом необходимо все выбранные для поверки записи измерений контрольного источника в журнале измерений обработать по шаблону «Поверка».

Для обработки результатов измерений из архива необходимо выделить требуемые записи архива и щёлкнув по клавише «Обработать спектр...» , провести обработку выделенных записей.

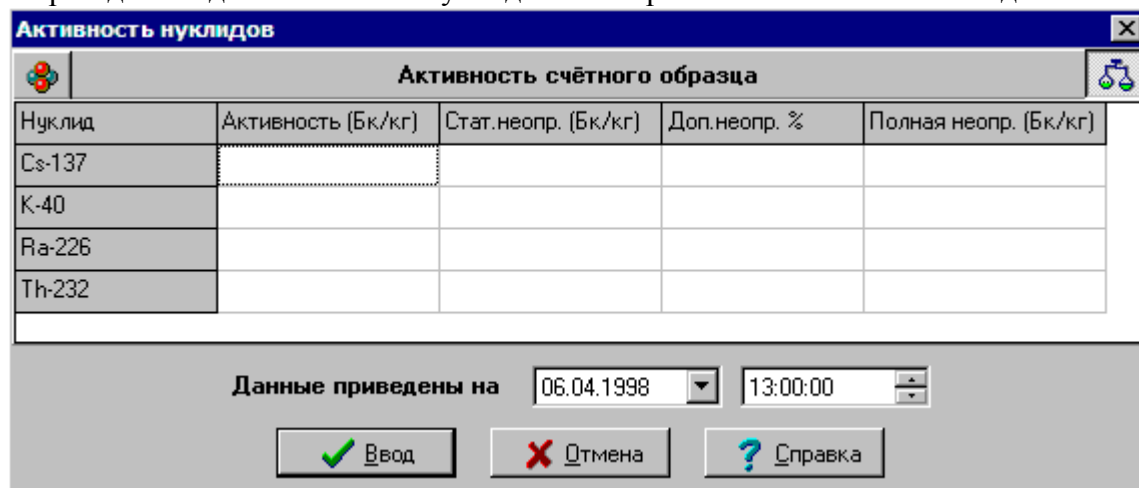


Проба	Описание пробы	Дата измерения	Время из	Дата значени	Cs-137
КИ № 2403	Контрольный ист	11.12.2008 14:01	149.7	08.10.2003	1.4030
КИ № 2403	Контрольный ист	12.12.2008 10:49	149.7	08.10.2003	1.4020
КИ № 2403	Контрольный ист	12.12.2008 10:52	149.7	08.10.2003	1.3920
КИ № 2403	Контрольный ист	15.12.2008 10:50	149.7	08.10.2003	1.4040
КИ № 2403	Контрольный ист	15.12.2008 11:21	149.7	08.10.2003	1.3990
КИ № 2403	Контрольный ист	15.12.2008 11:55	149.7	08.10.2003	1.3990
КИ № 2403	Контрольный ист	15.12.2008 12:00	149.7	08.10.2003	1.3920
КИ № 2403	Контрольный ист	15.12.2008 12:06	149.7	08.10.2003	1.3950
КИ № 2403	Контрольный ист	16.12.2008 09:50	149.7	08.10.2003	1.3990

Всего записей: 9, выбрано записей: 9

В этом случае данные об активностях нуклидов в контрольном источнике процедура обработки «Поверка» запросит при обработке первого спектра.

Форма для ввода активностей нуклидов в контрольном источнике выглядит так:



Нуклид	Активность (Бк/кг)	Стат.неопр. (Бк/кг)	Доп.неопр. %	Полная неопр. (Бк/кг)
Cs-137				
K-40				
Ra-226				
Th-232				

Данные приведены на 06.04.1998 13:00:00

Ввод Отмена Справка

Сведения об активностях и неопределённостях нуклидов приводятся на дату аттестации. Данные о неопределённостях вводятся в графу «Стат.неопр. (Бк/кг)» и «Доп.неопр %». Значения в графе «Полная неопр. (Бк/кг)» рассчитываются программой. Если данные об активностях не требуются (при измерениях фоновой пробы) их вводить не надо.

9.2. Статистическая обработка результатов измерения контрольного источника

Процедуры проведения статистической обработки результатов измерений подробно

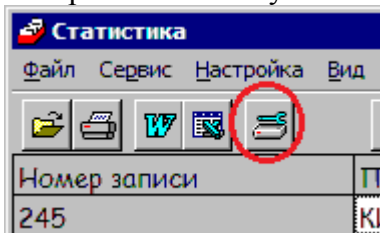
изложены в руководстве пользователя программного пакета «СПЕКТРРАД». Поэтому в дальнейшем, при необходимости более детального описания проведения каких-либо процедур, оператор может пользоваться руководством пользователя программного пакета «СПЕКТРРАД».

Для статистической обработки результатов измерений контрольного источника выделите в журнале последние 5-10 записей измерений контрольного источника.

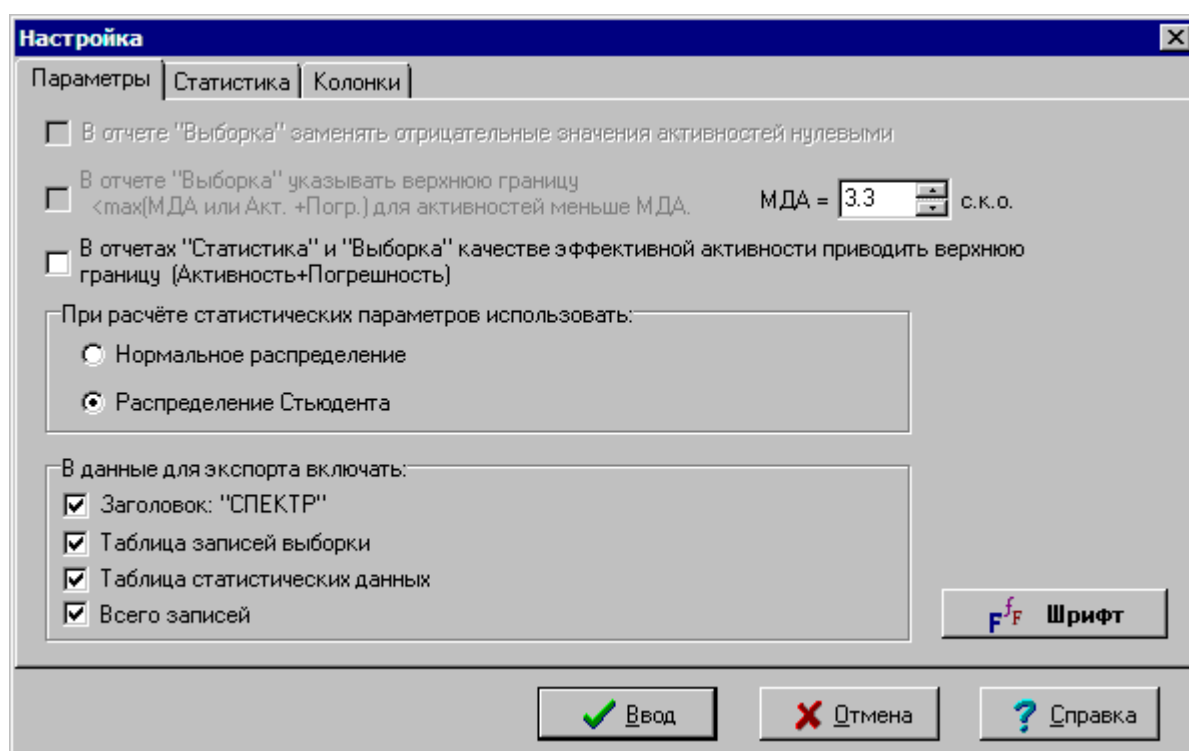
9.2.1 Оценка погрешностей измерений

Щелчок по клавише «Статистика»  выводит окно формы «Статистика»

Рассчитываемые статистические параметры, параметры расчёта и колонки журнала измерений используемые при расчёте устанавливаются при настройке формы «Статистика»:

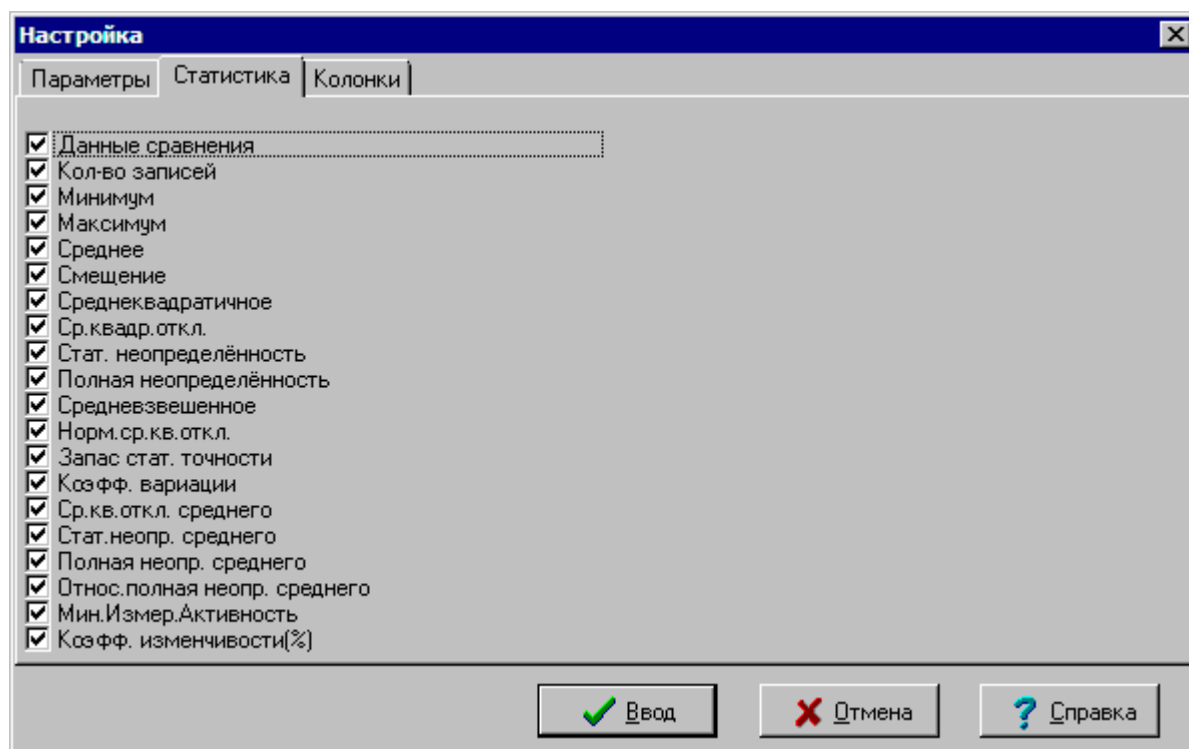


На странице «Параметры» задаётся используемый при расчёте статистических показателей вид распределения (нормальное или Стьюдента), число среднеквадратичных отклонений (с.к.о.) при расчёте нижнего предела обнаружения или минимально измеряемой активности (на форме параметр назван МДА) и содержимое формы передаваемое при экспорте данных в Word или Excel.

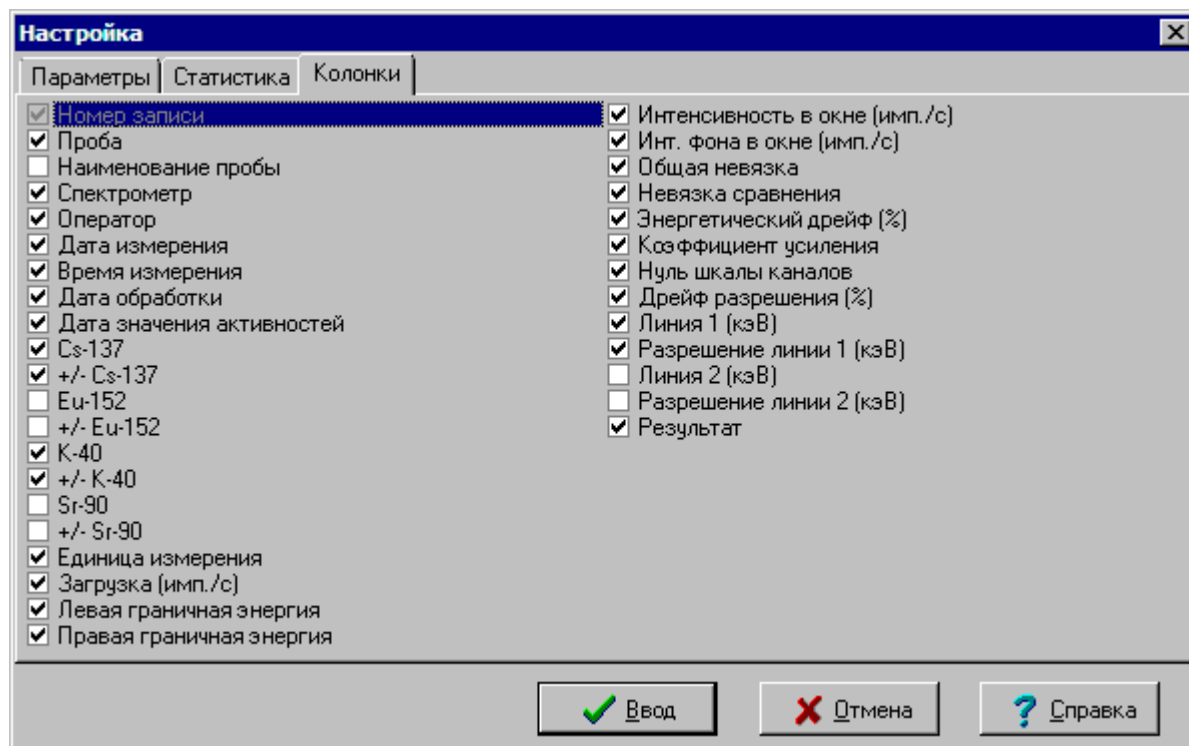


Требуется использовать распределение Стьюдента и значение 3.3 для МДА установленное для расчёта нижнего предела диапазона измерений.

На странице «Статистика» задаются рассчитываемые статистические параметры выборки:



На странице «Колонки» указываются колонки журнала измерений используемые при формировании выборки:



Форма с представлением случайной составляющей погрешностей может иметь вид:

Номер записи	Cs-137	+/- Cs-137	K-40	+/- K-40	Единица	Общая невязка	Невязка сравне
245	1770	130	16600	1300	Бк	3.6	2.4
243	1730	130	16400	1300	Бк	3.6	2.1
242	1760	240	15800	3500	Бк	5.7	1.5
241	1690	130	16600	1300	Бк	3.6	1.7
240	1720	140	16300	1400	Бк	3.8	1.9
239	1660	130	16000	1300	Бк	3.5	1.6
238	1680	120	16700	1200	Бк	3.4	1.7
237	1680	120	16400	1200	Бк	3.4	1.7
236	1690	120	16400	1200	Бк	3.4	1.8
235	1710	120	16300	1200	Бк	3.4	2
Данные сравнения	1500	120	16500	1300			
Кол-во записей	10	10	10	10		10	10
Минимум	1660	130	15800	3500		3.4	1.5
Максимум	1770	130	16700	1200		5.7	2.4
Среднее	1709	45	16400	500		3.74	1.84
Смещение	210		150				
Среднеквадратичное		142		1630			
Ср.кв.откл.	36		276			0.701	0.267
Стат. неопределённость	81.5		624			1.59	0.605
Полная неопределённость	118		1030				
Средневзвешенное	1700	40	16400	400			
Норм.ср.кв.откл.	0.52		0.34				
Запас стат. точности (%)	93		192				
Критерий сравнения	0.031		0.017			0.10	0.15

Значения случайной составляющей неопределённостей отображаются на форме голубым цветом. Максимальное значение в колонке значений выделяется жёлтым цветом, а минимальное – зелёным.

Ячейки статистических параметров со значениями, выходящими за допустимые границы, выделяются красным цветом. Ячейки статистических параметров со значениями, находящимися на границах допустимых значений, выделяются сиреневым цветом.

Нас интересует значение:

- смещения¹⁷ (в примере – 210 Бк для Cs-137);
- нормированного среднеквадратичного отклонения¹⁸ (в примере - 0.51 для Cs-137);
- запаса статистической точности¹⁹ (в примере – 95 % для Cs-137);
- среднего для общей невязки²⁰ (в примере - 3.75 для Cs-137):

Невязка определяет, насколько используемая модель соответствует измеренному спектру. Причиной невязки превышающей допустимое значение может быть:

1. присутствие значимых неучтённых нуклидов в счётном образце;
2. нарушение равновесия в радиоактивных цепочках;
3. некомпенсированный энергетический дрейф спектрометра;
4. параметры счётного образца (масса, плотность или эффективный атомный номер) за пределами допустимых значений;
5. нарушение геометрии измерений;
6. параметры спектрометра вышли за пределы допустимых значений.

При проверке мы должны быть уверены, что первые пять причин отсутствуют, и превышение невязки вызвано последней.

Одним из параметров влияющих на величину невязки является дифференциальная нелинейность спектрометра. Суть параметра в следующем: в пакете «СПЕКТРРАД» предполагается, что статистика отсчётов, зарегистрированных в каналах спектрометра, имеет составной характер: вследствие дифференциальной нелинейности амплитудно-цифрового преобразователя (АЦП) спектрометра, к Пуассоновской статистике вылетевших из ядер вещества квантов излучения добавляется линейная составляющая (дисперсия отсчётов $D_n = N + (k \cdot N)^2$).

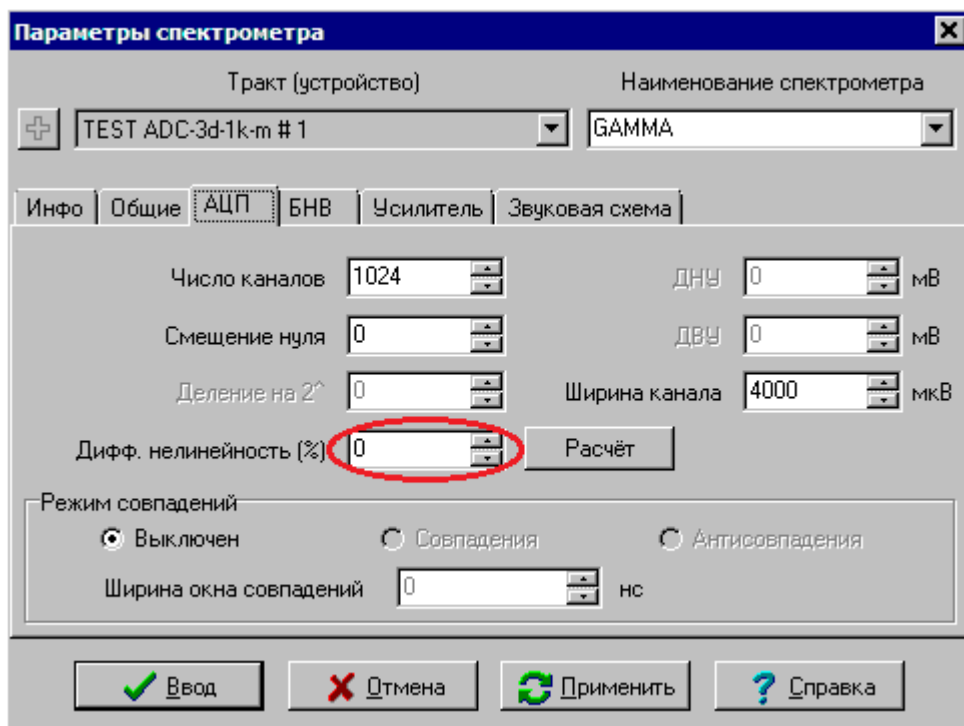
Коэффициент при линейной составляющей **k** называется дифференциальной нелинейностью спектрометра и задаётся в параметрах спектрометра (п. меню «Спектрометр/Установка/Спектрометра»)

¹⁷ **Смещение** - $Bias = abs(X_{Norm} - X_m)$ - отклонение оценки среднего по выборке от заданного значения.

¹⁸ **Норм.ср.кв.откл.** - нормированное на оценку стандартного отклонения среднеквадратичное отклонение $G_{norm} = 2 \cdot \sqrt{\sum ((X_i - X_m)^2 / \Delta_i^2) / \chi_{50}^2(n-1)}$. Коэффициент 2 для учёта того, что в качестве Δ_i используется 95% доверительный интервал.

¹⁹ **Запас точности** – выраженное в процентах отклонение реальной точности рассчитанной по выборке от значения паспортной точности рассчитанной программой $AccSpls = 100 \cdot (1/G_{norm} - 1) \%$.

²⁰ **Невязка** - отклонение рассчитанной модели от измеренного спектра в стандартных отклонениях.



Этот параметр существенно влияет и на расчёт погрешностей (неопределённостей) оценок рассчитываемых при обработке спектра величин, поскольку расчёт погрешностей напрямую связан с предполагаемой статистической моделью.

Устанавливать значение дифференциальной нелинейности спектрометра более 5% не рекомендуется. При больших значениях дифференциальной нелинейности в линейной составляющей статистики потонут все значимые нарушения модели: и нарушения равновесия и присутствие значимых неучтённых нуклидов.

Смещение является оценкой систематической составляющей неопределённости. Допустимая величина смещения связана с точностью аттестации эталонов использованных при калибровке и поверке спектрометра. Аттестованные значения активности X_{Norm} и неопределённости контрольного источника $\Delta_{X_{norm}}$ приводятся в строке «Данные сравнения» формы статистики. Эти значения разрешено редактировать.

Если величина смещения плюс погрешность оценки смещения нормированная на аттестованное значение активности меньше допустимой систематической погрешности $(|X_{norm} - X_m| + \Delta X_m) / X_{norm} < \delta$, смещение находится в допустимых границах и результат поверки по величине смещения считается положительным. Здесь δ - заданное допустимое относительное значение смещения (в примере – 120 Бк/1500 Бк = 8% для Cs-137). X_{Norm} - аттестованное значение активности (в примере – 1500 Бк для Cs-137). Обычная величина для δ – 10 % (в примере – 8% для Cs-137). ΔX_m - оценка неопределённости среднего по выборке (в примере – 45 Бк для Cs-137).

Если величина смещения минус погрешность оценки смещения нормированная на аттестованное значение активности больше допустимой систематической погрешности $(|X_{norm} - X_m| - \Delta X_m) / X_{norm} > \delta$, смещение выходит за рамки допустимого диапазона и результат поверки считается отрицательным.

Если величина смещения плюс погрешность оценки смещения больше нормы $(|X_{norm} - X_m| + \Delta X_m) / X_{norm} \geq \delta$, но величина смещения минус погрешность оценки смещения меньше нормы $(|X_{norm} - X_m| - \Delta X_m) / X_{norm} < \delta$, требуется уточнить значение смещения и для этого, либо увеличить объём выборки, либо использовать более длительные измерения

контрольного источника.

Величина нормированного среднеквадратичного отклонения (в примере - 0.51) и его производной – запаса статистической точности (в примере 95%) показывает насколько действительное значение случайной составляющей погрешности для величин активностей больше или меньше паспортного значения. Паспортное значение случайной составляющей погрешности в нашем случае зависит от многих факторов (времени накопления спектра, набора нуклидов, разрешения спектрометра, уровня фона и т.п.) и рассчитывается программой для каждого измерения. Отрицательная величина запаса точности свидетельствует о том, что реальная случайная составляющая неопределённости измерения активностей превышает рассчитываемую программой величину. Положительная величина говорит о том, что программа завышает рассчитываемые случайные составляющие неопределённости активностей. Допустимый диапазон для запаса точности от -20% до 100%.

В том случае если не удаётся добиться значения запаса точности не выходящего за указанные пределы и значения среднего для невязки меньше или равного 2.0 при варьировании дифференциальной нелинейности от 0 до 10%, результат поверки считается отрицательным.

9.2.2 Оценка дрейфа коэффициента преобразования

Спектрометр преобразует энергию регистрируемого кванта в значение номера канала спектра, где зарегистрируется этот квант излучения.

Используемый энергетический диапазон регистрируемых квантов определяется при калибровке и настройке спектрометра (см. главу «Настройка» руководства пользователя) и указывается в свидетельстве о калибровке спектрометра.

Вследствие дрейфа параметров спектрометрического тракта спектрометра (коэффициента преобразования, нуля шкалы каналов) с течением времени, рабочий диапазон спектрометра может измениться. При периодической поверке определяется: насколько изменился (сдрейфовал) коэффициент преобразования энергетической шкалы и ноль шкалы каналов и остался ли используемый энергетический диапазон в пределах рабочего диапазона регистрируемого спектрометром излучения.

В программном пакете «СПЕКТРРАД» значения дрейфа коэффициента усиления (преобразования) энергетической шкалы и значения дрейфа нуля шкалы каналов сохраняются в журнале измерений. При поверке рассматривается значение дрейфа коэффициента преобразования (усиления) усреднённое по последним 5-10 измерениям процедурой статистической обработки результатов измерений.:

Номер записи	Невязка срав	Энергетическ	Коэффициент	Нуль шкалы к	Нелинейные и
0	0.36854	16.8	1.164	33.5	0
1	0.44662	16.1	1.158	33.4	0
2	0.44967	16.4	1.16	33.4	0
3	0.43924	14.7	1.143	33.4	0
4	0.57949	14.6	1.142	33.4	0
5	0.18088	14.8	1.144	33.4	0
6	0.34966	14.3	1.139	33.6	0
7	0.57896	15.2	1.148	33.5	0
8	0.37202	14.5	1.141	32.7	0
9	0.33726	13.9	1.136	32.4	0
Данные сравнения					
Кол-во записей	10	10	10	10	10
Минимум	0.18088	13.9	1.136	32.4	0
Максимум	0.57949	16.8	1.164	33.6	0
Среднее	0.41023	15.13	1.1475	33.27	0
Смещение					

При начальной калибровке спектрометра условный коэффициент преобразования (усиления) устанавливается равным единице, а нуль шкалы каналов равным нулю.

В примере дрейф коэффициента преобразования (усиления) на дату поверки $\Delta k = 100 \cdot (1.1475 - 1) = 14.75\%$, дрейф нуля шкалы = 33.27 канала. Поскольку весь диапазон используемых каналов равен 1024, дрейф нуля шкалы $\Delta z = 3.2\%$.

В том случае, если с помощью предусмотренных в спектрометре регулировок не удаётся установить коэффициент усиления (преобразования) энергетического тракта в такое значение, чтобы дрейф спектрометра находился в диапазоне: -50% +50% от начального значения, установленного при калибровке спектрометра, а дрейф нуля шкалы каналов находился в диапазоне: -10% – +10.% от числа каналов спектрометра, результат поверки считается отрицательным.

При дрейфе коэффициента преобразования и нуля шкалы каналов меняется и рабочий диапазон спектрометра. При увеличении значения условного коэффициента преобразования энергетическая шкала сжимается, и левая граница может выйти за пределы регистрируемого диапазона. Регистрируемый диапазон определяется дискриминатором нижнего уровня АЦП (ДНУ). ДНУ может задаваться, в зависимости от типа АЦП в милливольтках или каналах. Если ДНУ задан в милливольтках, его надо перевести в каналы, разделив на ширину канала АЦП (мв/кан).

Если значение границы используемого диапазона в каналах (по актуальной энергетической калибровке) меньше значения ДНУ, результат поверки считается отрицательным.

9.2.3 Оценка энергетического разрешения

При обработке гамма и альфа спектров в программном пакете «СПЕКТРРАД» процедура обработки варьирует разрешение спектрометра для достижения наилучшего результата подгонки модели спектра к реальному спектру. Результаты оценки текущего разрешения спектрометра при обработке спектра контрольного источника сохраняются в

архиве «Поверка».

Номер записи	Дрейф разрешения	Линия 1 (кэВ)	Разрешение л	Линия 2 (кэВ)	Разрешение л	Ре
0	0.46	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	+
1	0	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	+
2	0	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	+
3	0	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	+
4	0	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	+
5	0	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	+
6	0	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	+
7	0	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	+
8	0	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	-
9	0	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	+
Данные сравнения						
Кол-во записей	10	10	10	10	10	
Минимум	0	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	
Максимум	0.46	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	
Среднее	0.046	661.534	44.5344	2614.41	88.6221	
Сравнение						

Предельно допустимым значением для дрейфа разрешения является 50% (в примере 0,046 %). **В том случае, если с помощью предусмотренных в спектрометре регулировок не удаётся установить параметры энергетического тракта в такое значение, чтобы дрейф разрешения спектрометра не превышал 50% от начального значения установленного при калибровке спектрометра, результат поверки считается отрицательным.**

9.3. Измерения фона

Для измерения фона, так же как и при измерении контрольных источников, можно воспользоваться режимом циклических измерений. Время измерения фона должно быть не менее времени установленного для процедуры контроля фона и достаточным для набора в среднем не менее 10 импульсов на канал в рабочем диапазоне спектрометра. Для гамма, бета спектрометров, как правило, 1 час, для альфа спектрометров, как правило не менее 2-х часов.

При запуске измерений фона необходимо указать, что измеряемая проба является фоновой пробой. Для этого в таблице параметров пробы при запуске измерений в графе «Тип пробы» надо указать тип, зарегистрированный для фоновых проб.

Запуск циклических измерений

Файл Справка

Спектрометр **ГAMMA** Геометрия **МАРИНЕЛЛИ**

Проба | Описание пробы

Проба: **Фон** | Тип пробы: **Фон**

Описание пробы: _____

Оператор: **Смирнова И.В.**

Дата аттестации: 01.01.1970 3:00:00 | 27.10.2015 14:58:15

Масса сч. образца: 1000 г

Концентрирование материала пробы

Физическое концентрирование

Химическое выделение

Масса концентрата (г): 0


Количество исходного материала: 0 г

Химический выход (%): 0

Шаблон обработки спектра:

Во время набора: **Наблюдение** | Результаты измерений: **Поверка**

Нет необходимости и часто нет возможности (при альфа радиометрии/спектрометрии) проводить не менее пяти измерений фона (контрольного источника с нулевыми значениями активностей для всех регистрируемых нуклидов) непосредственно поверителем. Поверитель обязан провести, по меньшей мере, одно измерение фона. А остальные данные по измерениям фона использовать из архива измерений ежедневного контроля фона при проведении рабочих измерений в том случае, если все они проведены не позднее месяца до даты поверки.

Как правило, в настройках спектрометра задаётся, что фон является идентичным для всех используемых геометрий спектрометра. Практически это так, поскольку свинцовая защита детектора ослабляет внешнее фоновое излучение в десятки раз сильнее, чем материал счётного образца (если, конечно материал счётного образца не сравним по плотности и толщине с защитой детектора), а фоновое излучение от конструкционных материалов детектора совсем не зависит от пробы. В этом случае (фон идентичен для всех геометрий) необходимо после выборки в журнале измерений 5-10 последних измерений фона перевести все спектры фона в требуемую рабочую геометрию. Для этого отредактируйте один из спектров фона по процедуре «Правка / Редактировать запись...» (кнопка ) , установив нужную геометрия и массу счётного образца:

Параметры пробы

Файл Справка

Спектрометр: GAMMA Геометрия: **МАРИНЕЛЛИ**

Проба: Описание пробы

Проба: Фон

Описание пробы:

Оператор: Дрёмин Г.И.

Дата аттестации: 01.01.1970 3:00:00

26.10.2015 10:10:11

Масса сч. образца: **1000** г

Концентрирование материала пробы

Физическое концентрирование

Химическое выделение

Масса концентрата (г): 0

Количество исходного материала: 0 г

Химический выход (%): 0

Ввод Отмена Справка

Затем импортируйте данные по геометрии и массе счётного образца во все остальные выделенные записи фона (п.меню «Правка / Импорт данных...»):

Импорт записей

Импортировать содержимое текущей записи № 384, проба "Фон" в выделенные записи для колонок:

Проба

Наименование пробы

Спектрометр

Геометрия

Оператор

Тип пробы

Описание пробы

-

-

-

Примечание

-

-

-

-

-

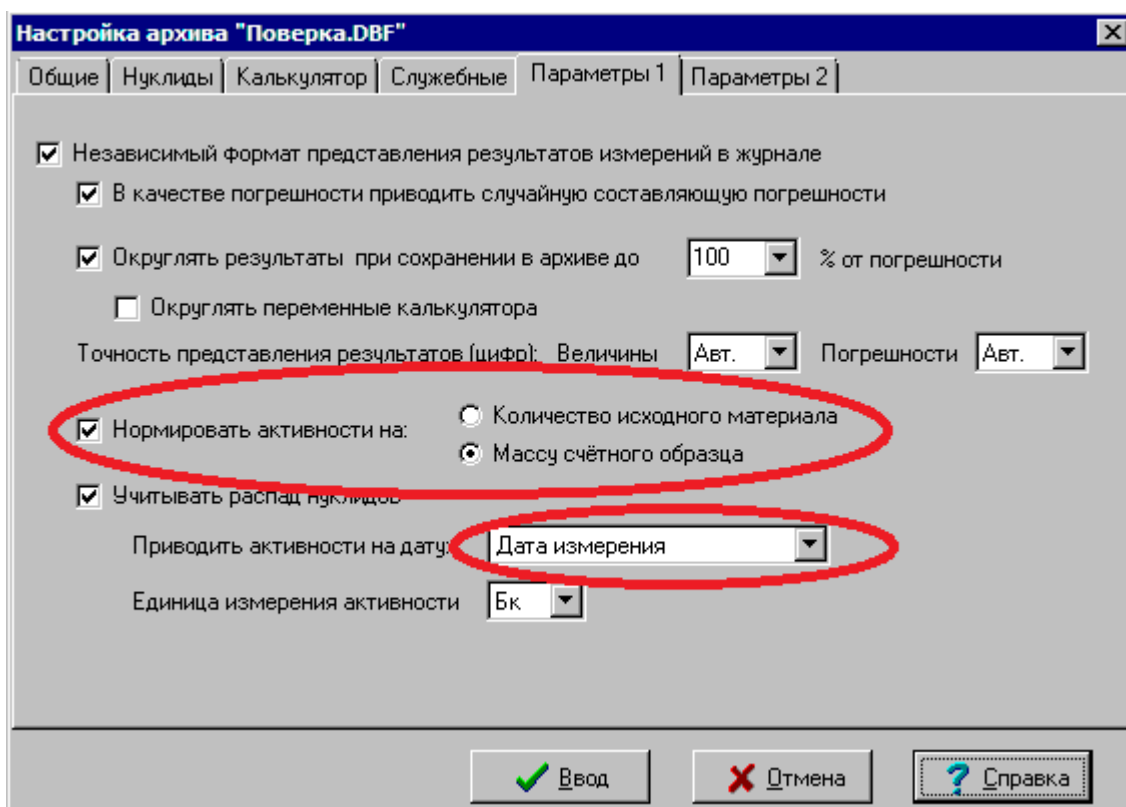
Дата аттестации


Количество пробы

Ввод Отмена Справка

Обработайте выделенные записи по шаблону «Поверка» (данные по активностям можно не вводить, можно указать нулевые значения активностей).

Результаты обработки спектров фона необходимо сохранять в журнале на дату измерения, поэтому предварительно в параметрах настройки журнала (страница «**Параметры 1**» необходимо выбрать **режим представления активностей на дату измерения** и, если минимально измеряемая активность приводится в Бк/кг выбрать **нормировку на массу счётного образца**²¹:



После обработки спектров фона так же, как и для контрольного источника, необходимо выделить в архиве записи с результатами измерений фона и обработать их по процедуре «Статистика» (п. меню «Команды / Статистика...» ).

9.3.1. Расчёт коэффициента изменчивости фона и нижнего предела диапазона измерений для «сцинтилляционных» спектрометров

Минимально измеряемая активность и нижний предел диапазона измерений является весьма информативным параметром спектрометра. Он зависит и от эффективности регистрации детектора и от уровня фона спектрометра и от разрешения детектора.

В Методике радиационного контроля (МИ 2453 – 2000) разработанной Государственным научным метрологическим центром «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ГНМЦ ВНИИФТРИ) Госстандарта России (утверждена ГНМЦ ВНИИФТРИ « 21 » ноября 2000 г.) так определяется нижний предел диапазона измерений:

²¹ Для измерений в тонком (гамма тракты) МИА или МДА приводится в Бк, для измерений в толстом слое (альфа радиометрия) в Бк/кг. Для измерений в промежуточном слое (бета тракты) МИА или МДА может приводиться и в Бк и в Бк/кг.

2.12. Нижний предел диапазона измерений радиационного параметра – устанавливаемое по результатам метрологического исследования минимальное значение радиационного параметра, которое может быть измерено с помощью данного СИ и регламентированной методики выполнения измерений (включая методику пробоотбора и подготовки счетного образца) в реальных условиях измерений с полной (суммарной) неопределенностью 60% при доверительной вероятности $P=0,95$.

Нижний предел устанавливается для типовых условий конкретного применения средства измерений (методики). Результаты измерений меньше нижнего предела, получаемые в конкретных измерениях, требуют дополнительного подтверждения их достоверности.

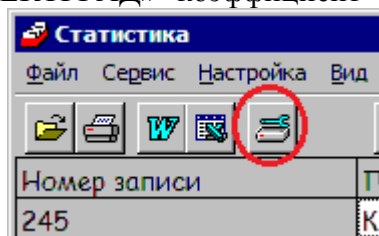
При таком определении рассчитать точно нижний предел диапазона измерений по результатам измерений фоновой или малоактивной пробы невозможно²². Поэтому приходится пользоваться приближением к определению. Для оценки нижнего предела диапазона измерения мы используем 3.3 среднеквадратичных отклонения (с.к.о.) оценок активностей при измерении пустой (фоновой) пробы²³.

Программа обработки спектров в пакете «СПЕКТРРАД» рассчитывает погрешности оценок активностей ΔA ($P=0.68$) и величину $L = k \Delta A$ (k задается в параметрах настройки архива измерений) исходя из предполагаемой статистической модели спектра пробы, спектра фона и алгоритма решения. Величина L используется для формирования отчёта о результатах измерения. Для активностей близких к нулю L будет соответствовать нижнему пределу измерения при установке $k = 3.3$. Задача поверки оценить насколько корректно программа оценивает эту величину и при необходимости и возможности скорректировать настройки программы.

Для «сцинтилляционной» спектрометрии использующей линейные оценки активности нуклидов возможно прямое определение средне-квадратичного отклонения и статистической неопределённости по выборке из ряда измерений фоновой пробы.

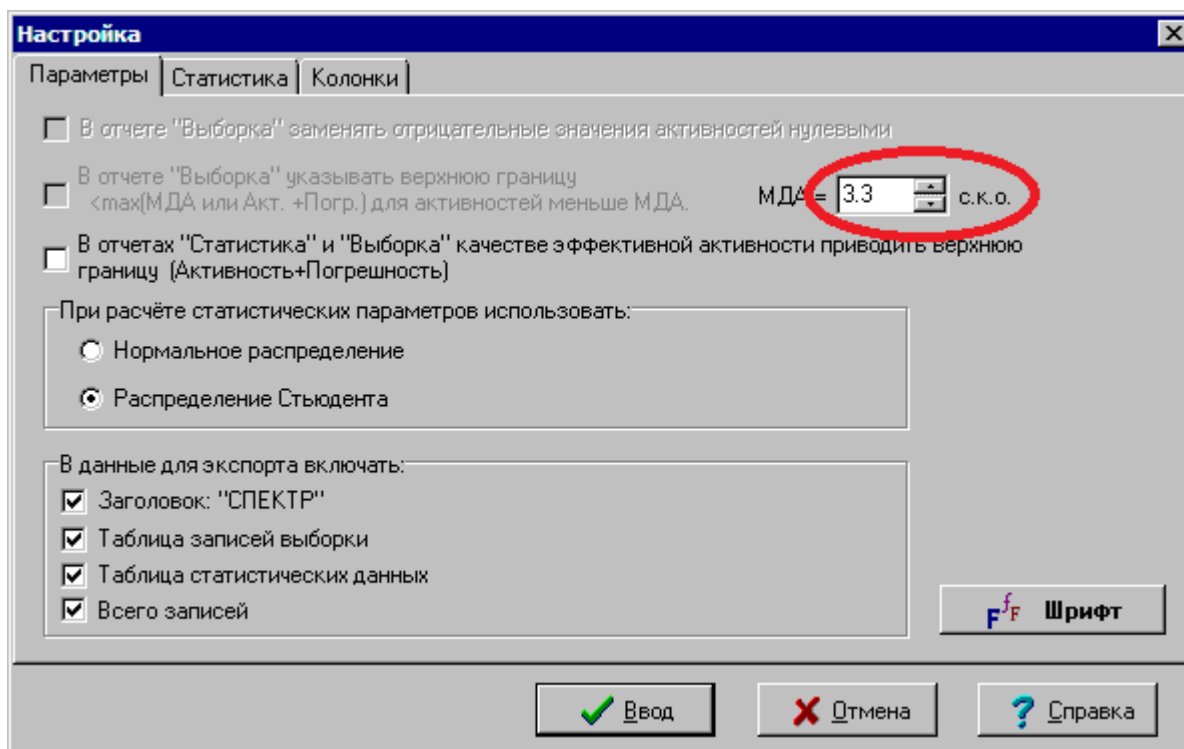
Для расчёта нижнего предела диапазона измерения средне-квадратичное отклонение оценки интересующей нас активности для выборки из n ($n > 5$) измерений фоновой пробы умножается на коэффициент 3.3 или статистическая неопределённость умножается на 1.65 ($3.3/2 = 1.65$). Предпочтительнее использовать статистическую неопределённость, поскольку при этом учитывается ограниченность выборки (при использовании распределение Стьюдента). В программном пакете «СПЕКТРРАД» коэффициент $k = 3.3$ задается в

параметрах настройки формы «Статистика»:



²² Посчитать нетрудно, если у нас определяется только один параметр по интегральному счёту в окне – в этом случае получаем одно квадратное уравнение (уравнение 2-ой степени). При нескольких неизвестных и многих окнах получаем систему квадратных уравнений.

²³ Это соответствует действительности только в случае достаточной интенсивности фона (при $T_{\phi}=T_n = 1$ час для достижения $\Delta A_0=0.9\Delta A_{50\%}$ требуется интенсивность фона превышающая 160 имп/час или $44 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$), что выполняется для большинства гама бета спектрометров.



Вместо «нижнего предела диапазона измерений» часто используется понятие «минимально измеряемая активность» (МИА), которая определяется как активность измеряемая с 50% неопределенностью. В этом случае при оценке МИА коэффициент **к** требуется установить равным **4**.

После вызова процедуры «Статистика» мы получим, например, следующий результат:

Номер записи	Загрузка (имп./с)	Левая граничная энергия	Правая граничная энергия	Интенсивность в окне
1864	9.969	200	3230.61	8.835
1866	10.05	200	3230.61	8.958
1868	10.11	200	3230.61	9.021
1870	10.4	200	3191.23	9.332
1872	10.02	200	3230.61	8.968
1874	10.29	200	3230.61	8.933
1876	10.47	200	3230.61	9.36
1878	9.822	200	3230.61	8.733
1880	10.41	200	3230.61	9.271
1882	10.69	200	3230.61	9.34
Кол-во записей	10	10	10	10
Минимум	9.822	200	3191.23	8.733
Максимум	10.69	200	3230.61	9.36
Среднее	10.2231	200	3226.67	9.0751
Запас стат. точности (%)	-71			-68
Коэфф. изменчивости (%)	2.5			2.4

Обратим внимание на «Запас.стат.точности (%)» и «Кэфф.изменчивости (%)» для колонок «Загрузка (имп./с)» и «Интенсивность в окне (имп./с)»²⁴. Значения минус 71 % для загрузки и минус 68% для интенсивности в окне говорят о том, что среднеквадратичное отклонение для величин загрузки и интенсивности на ~70% больше предполагаемого. А предполагаем мы составную Пуассоновскую статистику. Причём при расчёте запаса точности для колонок «Загрузка» и «Интенсивность в окне» для спектров имеющих «тип пробы» совпадающий с зарегистрированным типом пробы для спектров фона, в качестве линейного коэффициента программа берёт параметр «Изменчивость фона» задаваемый в таблице настроек процедуры контроля фона (п. меню «Калибровка\Фон\Настройка..»):

Параметры контроля фона

Спектрометр: GAMMA-2017

Геометрия: KI

Параметры измерения | Параметры обработки

Границы обработки, кэВ: 230 -- 3300 [1]

Число итераций: 100

Коэффициент демпфирования: 0 %

Изменчивость фона: 0 %

Допустимая невязка: 1.1

Допустимый дрейф: 5 %

Режим коррекции дрейфа

Дрейф усиления Дрейф нуля шкалы

Идентичный фон в геометриях:

KI, PETRI, MARINELI [Добавить]

Шаблон обработки спектра:

Во время набора спектра: Фон

Результата измерений:

[Ввод] [Отмена] [Применить] [Справка]

У нас задана нулевая изменчивость фона – нулевой коэффициент линейной составляющей в формуле составной пуассоновской статистики спектров фона. Значение этой величины для интенсивности в окне, рассчитанное процедурой «Статистика», равно 2.4%. Установим это значение в параметрах контроля фона.

²⁴ **Загрузка** – интенсивность всех регистрируемых спектрометром импульсов.

Интенсивность в окне - интенсивность регистрируемых спектрометром импульсов в заданном энергетическом окне.

Получим следующий результат:

Номер записи	Загрузка (имп./с)	Левая граничная энергия	Правая граничная энергия	Интенсивность в окне
1864	9.969	200	3230.61	8.835
1866	10.05	200	3230.61	8.958
1868	10.11	200	3230.61	9.021
1870	10.4	200	3191.23	9.332
1872	10.02	200	3230.61	8.968
1874	10.29	200	3230.61	8.933
1876	10.47	200	3230.61	9.36
1878	9.822	200	3230.61	8.733
1880	10.41	200	3230.61	9.271
1882	10.69	200	3230.61	9.34
Кол-во записей	10	10	10	10
Минимум	9.822	200	3191.23	8.733
Максимум	10.69	200	3230.61	9.36
Среднее	10.2231	200	3226.67	9.0751
Запас стат. точности (%)	-4			0
Козэфф. изменчивости (%)	2.5			2.4

Запас точности для величин общей загрузки и интенсивности в окне соответствует норме.

В том случае, если при установке коэффициента изменчивости фона равного 10 % значение запаса точности для интенсивности в окне менее минус 20%, фон считается недопустимо нестабильным (его изменчивость, по-видимому, определяется шумом электронного тракта спектрометра) и результат поверки считается отрицательным.

Посмотрим на значения активностей нуклидов:

Номер записи	Cs-137	+/- Cs-137	K-40	+/- K-40	Ra-226	+/- Ra-226	Th-232	+/- Th-232	Единица
1864	-1.2	2.4	-17	35	-2.6	2.5	1	1.8	Бк/кг
1866	0.2	2.5	0	35	-1.1	2.7	0.1	1.9	Бк/кг
1868	-0.1	2.4	30	35	0.5	2.6	-1.7	1.8	Бк/кг
1870	0.5	2.5	30	40	0.3	2.7	-0.2	1.9	Бк/кг
1872	0.3	2.3	9	35	0.3	2.5	-0.9	1.8	Бк/кг
1874	0.2	2.5	-2	35	-0.9	2.5	0.5	1.8	Бк/кг
1876	0.9	2.6	31	35	1.8	2.7	-1.1	1.8	Бк/кг
1878	0.9	2.4	0	40	-0.5	2.5	-1.3	1.8	Бк/кг
1880	-0.6	2.7	0	40	-0.4	2.9	0.9	2.1	Бк/кг
1882	0.8	2.6	4	35	0.5	2.7	1.2	2	Бк/кг
Кол-во записей	10	10	10	10	10	10	10	10	
Минимум	-1.2	2.4	-17	35	-2.6	2.5	-1.7	1.8	
Максимум	0.9	2.6	31	35	1.8	2.7	1.2	2	
Среднее	0.2	0.8	9	12	-0.2	0.8	-0.1	0.6	
Среднеквадратичное		2.49		36.6		2.63		1.87	
Ср.кв.откл.	0.677		16.4		1.19		1.05		
Стат. неопределённость	1.35		32.9		2.37		2.1		
Полная неопределённость	1.35		32.9		2.37		2.1		
Запас стат. точности (%)	83		10		9		-10		
Стат.неопр. среднего	0.428		10.4		0.75		0.664		
Полная неопр. среднего	0.429		10.4		0.75		0.664		
Мин.Изм.Акт.(МИА=4.0 ско)	3.5		50		4		2.7		

Значения среднеквадратичного отклонения (заключены в зелёные кружочки) определяют величину минимально измеряемой активности и нижнего предела измерения для данного времени измерения, данной геометрии и данной массы пробы²⁵. Для Российского стандарта при нашем условии - не менее 10 000 импульсов фона при длине спектра в 1000 каналов вполне подойдёт формула 3.3 с.к.о. для нижнего предела диапазона измерения.

Процедура «Статистика» самостоятельно рассчитывает значение минимально измеряемой активности или нижнего предела диапазона измерения (значения в синих кружках в нижней строчке). В данном случае в настройках архива установлено, что МИА = 4 с.к.о., то есть приведены значения минимально измеряемой активности, а не нижнего предела диапазона измерения

²⁵ Для тонкого слоя (гамма спектрометрия для сч. образцов небольших размеров: чашка «Петри», сосуд «Маринелли») значения нижнего предела диапазона измерений выраженные в Бк/пробу практически не зависят от массы пробы. Для переходного слоя (бета спектрометрия) – существенна зависимость от массы пробы и поэтому необходимо рассчитать значения нижнего предела диапазона измерений для крайних и средней точки рабочего диапазона навесок.

9.3.2 Расчёт нижнего предела диапазона измерений для «ППД» спектрометров

В «ППД» спектрометрии используется предварительное вычитание спектра непрерывного рассеяния, и оценка активностей производится по спектру пиков. Такая процедура делает практически невозможной прямое определение нижнего предела диапазона измерения по выборке измерений фоновой пробы (если в спектре фоновой пробы нет пиков, мы получим нулевой спектр и соответственно нулевые активности для всех нуклидов).

В то же время расчёт нижнего предела диапазона измерения проводимый программой по результатам обработки спектра содержащего нуклиды вполне корректен, поскольку используются линейные оценки (для расчёта погрешностей спектр непрерывного рассеяния не вычитается). Необходимо учитывать, что в процедуре поиска пиков есть параметр нижнего порога детектирования пиков. Для того, чтобы он не оказывал влияния на величину нижнего предела диапазона измерения, рабочий уровень порога детектирования должен быть установлен равным 1.0:

Параметры поиска пиков

Спектрометр: HPGE Геометрия: DENTA

Интервал обработки, кэВ: 25 - 1842

Метод поиска пиков:
 "Плавающий отрезок"
 "Марискотти" (обобщённая вторая разность)
 Свёртка с моделью пика
 Малая статистика спектра

Комптон под пиком:
 Интегральная ступенька
 МНК разложение спектра на полином и пики
Число итераций: 100 Допустимая невязка: 5
Дополнительная погрешность (%): 5

Ширина окон:
Детектирования пиков: 2 ширины пиков
Сглаживания спектра: 1 ширины пиков

Порог детектирования: 1 ср.кв.откл.
 Объединять неразрешённые пики

Допустимая погрешность пиков: 80 %

Идентичные параметры поиска пиков в геометриях:
КИ, MAR1000, MAR500, DENTA Добавить

Ввод Отмена Применить Справка

Суть проверки корректности расчёта нижнего предела диапазона измерения программой – в проверке корректности оценок погрешностей для активностей вблизи нижнего предела измерения. Время измерения выбираем такое, чтобы надёжно регистрировались значимые линии интересующих нас нуклидов, но не более этого. В качестве шаблона обработки используем шаблон «МИА», поскольку для нас сейчас нужны значения активностей и погрешностей на дату измерения. При статистической обработке результатов также указываем в настройках архива, что в качестве погрешности нас интересует случайная составляющая полной погрешности.

В итоге после обработки результатов по процедуре «Статистика» мы получим, например для Eu-152 такой результат:

Номер записи	Время измерен	Eu-152	+/- Eu-152	Единица	Интенсивность	Инт. фона в	Общая невязка
1684	300	19690	350	Бк/кг	108.175	0.16141	0.74127
1682	300	19500	350	Бк/кг	108.044	0.15964	0.75611
1679	300	20100	400	Бк/кг	108.612	0.15266	1.05999
1677	300	19900	300	Бк/кг	110.985	0.17736	0.6905
1671	300	20040	350	Бк/кг	111.863	0.17495	0.74041
1668	300	19990	350	Бк/кг	108.732	0.15055	0.72354
1666	300	20040	350	Бк/кг	110.216	0.15742	0.71832
Кол-во записей	7	7	7		7	7	7
Минимум	300	19500	350		108.044	0.15055	0.6905
Максимум	300	20100	400		111.863	0.17736	1.05999
Среднее	300	19890	130		109.518	0.162	0.77573
Среднеквадратичное			351				
Ср.кв.откл.	0	220			1.5	0.0104	0.127
Стат. неопределённость	0	441			3.01	0.0208	0.254
Полная неопределённость		659					
Запас стат. точности (%)		-18			-59		
Стат.неопр. среднего	0	167			1.14	7.86e-03	0.0961
Полная неопр. среднего		518					
Мин.Изм.Акт.(МИА=3.3 ско)		22					

Величина НИЖНЕГО ПРЕДЕЛА ИЗМЕРЕНИЯ=22 для 300 секунд измерения рассчитана процедурой «Статистика» исходя из следующего:

В случае, если суммарное время предварительного измерения спектра фона (спектра, который будет вычитаться из спектра пробы) значительно превышает (более чем в 5 раз) время измерения пробы можно пренебречь его вкладом в оценку погрешности и считать, что

погрешность $\Delta \approx \frac{R \cdot \sqrt{S}}{t}$, где R – невязка разложения (если невязка меньше единицы она принимается равной единице), S – площадь в окне, t – время измерения. То есть

$\frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{R_1 \cdot \sqrt{S_1} \cdot t_2}{R_2 \cdot \sqrt{S_2} \cdot t_1} = \frac{R_1}{R_2} \sqrt{\frac{I_1 \cdot t_2}{I_2 \cdot t_1}}$, где I_1 и I_2 интенсивности зарегистрированных импульсов.

Для расчёта погрешности соответствующей заданной интенсивности (при $t_1=t_2$) можно

воспользоваться формулой $\Delta(I) = \Delta_0 \cdot \frac{R(I)}{R_0} \sqrt{\frac{I}{I_0}}$ и для расчёта погрешности

соответствующей заданному времени измерения (при $I_1=I_2$) можно воспользоваться

формулой $\Delta(t) = \Delta_0 \cdot \frac{R(t)}{R_0} \sqrt{\frac{t_0}{t}}$. Для нижнего предела измерения $R=1$ и добавочный


коэффициент $k=n/2$, где n – число с.к.о в определении нижнего предела измерения. В примере $I=110$ имп./с, $I_0=0.162$ имп./с, $\Delta_0=351$ Бк, $R_0=1$, $n=3.3$. В итоге величина НИЖНЕГО

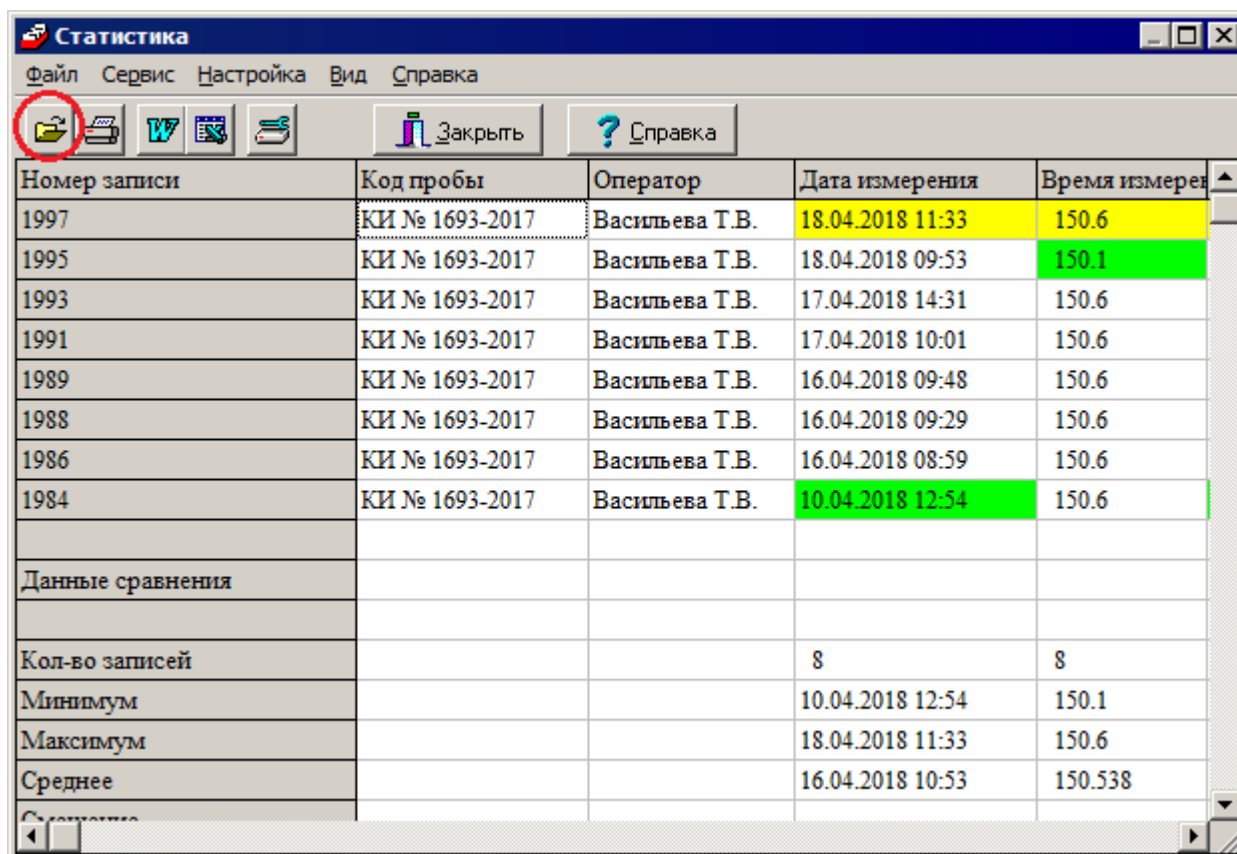
ПРЕДЕЛА ИЗМЕРЕНИЯ = $3.3 \cdot 351 \cdot \sqrt{\frac{0.162}{110}} / 2 = 22$ для 300 секунд. Для $t=3600$ секунд

$$\text{величина НИЖНЕГО ПРЕДЕЛА ИЗМЕРЕНИЯ} = 22 \cdot \sqrt{\frac{300}{3600}} = 6.4 \text{ Бк.}$$

Расчёт нижнего предела измерения будет тем точнее, чем ближе интенсивность эталонной пробы к интенсивности фона.

10. Оформление результатов поверки

В пакете «СПЕКТРРАД» создание протоколов результатов измерений или протоколов статистической обработки основано на передаче данных из формы отчёта или статистического отчёта в документ MS Word. Такой документ – шаблон протокола должен быть заранее создан. Процесс создания протокола заключается в том, что данные из отчёта (статистического отчёта) замещают специальные метки (см. главу «Метки статистического отчёта» руководства пользователя пакета «СПЕКТРРАД») в шаблоне протокола наследуя стиль, формат и шрифт меток. Для выбора шаблона протокола оператор должен щёлкнуть по кнопке  на форме «Статистика»:



Номер записи	Код пробы	Оператор	Дата измерения	Время измерения
1997	КИ № 1693-2017	Васильева Т.В.	18.04.2018 11:33	150.6
1995	КИ № 1693-2017	Васильева Т.В.	18.04.2018 09:53	150.1
1993	КИ № 1693-2017	Васильева Т.В.	17.04.2018 14:31	150.6
1991	КИ № 1693-2017	Васильева Т.В.	17.04.2018 10:01	150.6
1989	КИ № 1693-2017	Васильева Т.В.	16.04.2018 09:48	150.6
1988	КИ № 1693-2017	Васильева Т.В.	16.04.2018 09:29	150.6
1986	КИ № 1693-2017	Васильева Т.В.	16.04.2018 08:59	150.6
1984	КИ № 1693-2017	Васильева Т.В.	10.04.2018 12:54	150.6
Данные сравнения				
Кол-во записей			8	8
Минимум			10.04.2018 12:54	150.1
Максимум			18.04.2018 11:33	150.6
Среднее			16.04.2018 10:53	150.538

Примеры шаблонов протоколов приведены в приложении 5. Форма протоколов связана с использованным шаблоном обработки спектров: Например, протокол № 2 использует для расчёта смещения оценок данные об аттестованных активностях нуклидов. Если процедура обработки спектра «Поверка» записывает аттестованную активность какого-либо нуклида в графу Calc1, то эта графа должна использоваться и в протоколе № 2. Все протоколы поверки кроме первого формируются программой автоматически. Первый протокол содержит сведения о спектрометре и организации и заполняется вручную. Весь процесс оформления протоколов включает 3 операции:

1. Заполните протокол 1 приложения 5.
2. Пользуясь процедурой "Статистическая обработка" (п. меню "Команды/Статистика" формы "Архив измерений") сформируйте три отчёта по результатам измерения эталонной

пробы (протокол 2, протокол 3 и протокол 4). Отчёты должны включать не менее 10 результатов измерения эталонной пробы.

3. Пользуясь процедурой "Статистическая обработка" (п. меню "Команды/Статистика" формы "Архив измерений") сформируйте отчёт по результатам процедуры контроля фона в спектрометре (протокол 5 и протокол 6). Отчёт должен включать не менее семи результатов процедуры контроля фона не позднее, чем за десять последних дней. Для ППД спектрометров протокол 6 (расчёт нижнего предела измерения) формируется не по результатам измерений фоновой пробы, а по результатам измерений эталонной пробы.

При положительных результатах поверки спектрометра выдаётся свидетельство установленного образца.

При отрицательных результатах поверки выдаётся справка о непригодности, спектрометр запрещается к применению, свидетельство аннулируется.

Протокол 1

1. Наименование, тип и номер спектрометра: _____
2. Наименование организации _____
3. Дата выдачи и номер свидетельства о предыдущей аттестации (поверке) спектрометрического тракта: _____
4. Дата оплаты и номер плат. поручения _____
5. Тип блока детектирования и его номер: _____
6. Программное обеспечение: _____
7. Поверенные геометрии: _____
8. Контрольный (калибровочный) источник: _____
9. Активность нуклидов калибровочного источника на дату аттестации _____

нуклид	активность
--------	------------

нуклид	активность
--------	------------

11. Диапазон энергий спектрометрического канала: _____
12. Список определяемых нуклидов: _____ (приложение № _____)
13. Энергетическое разрешение спектрометрического канала по линии _____ кэВ – _____ %
14. Дифференциальная нелинейность спектрометра (%): _____
15. Изменчивость фона (%): _____
16. Минимально измеряемая активность за 3600 сек на пробу, Бк: _____ в геометрии _____

нуклид	значение
--------	----------

нуклид	значение
--------	----------

в геометрии _____

нуклид	значение
--------	----------

нуклид	значение
--------	----------

16. Замечания по работе спектрометра: _____

Протокол 2-гамма

{Program}
 {Analyser}
 Тракт {AnalNick}
 Геометрия: {Geometry}
 Проба: {Sample}, {SampleCode}
 {SampleNote}
 Масса пробы {SampleMass}
 Время измерения {MeasTime}
 Дата значения активностей {ActualDate}

Дата измерения	Cs 137 {AUnit}	K 40 {AUnit}	Ra 226 {AUnit}	Th 232 {AUnit}	Невязка
<<{MeasDate}	{Act&Err[Cs-137]}	{Act&Err[K-40]}	{Act&Err[RA-226]}	{Act&Err[TH-232]}	{GlbResiduals}
>>					
Данные сравнения	{CmpVal[Cs-137]}±{CmpErr[Cs-137]}	{CmpVal[K-40]}±{CmpErr[K-40]}	{CmpVal[RA-226]}±{CmpErr[RA-226]}	{CmpVal[TH-232]}±{CmpErr[TH-232]}	
Кол-во записей	{N[Cs-137]}	{N[K-40]}	{N[RA-226]}	{N[TH-232]}	{N[GlbResiduals]}
Минимум	{XMin[Cs-137]}±{GMin[Cs-137]}	{XMin[K-40]}±{GMin[K-40]}	{XMin[RA-226]}±{GMin[RA-226]}	{XMin[TH-232]}±{GMin[TH-232]}	{XMin[GlbResiduals]}
Максимум	{XMax[Cs-137]}±{GMax[Cs-137]}	{XMax[K-40]}±{GMax[K-40]}	{XMax[RA-226]}±{GMax[RA-226]}	{XMax[TH-232]}±{GMax[TH-232]}	{XMax[GlbResiduals]}
Среднее	{XO[Cs-137]}±{GS[Cs-137]}	{XO[K-40]}±{GS[K-40]}	{XO[RA-226]}±{GS[RA-226]}	{XO[TH-232]}±{GS[TH-232]}	{XO[GlbResiduals]}
Ср. квадр. откл.	{Sx[Cs-137]}	{Sx[K-40]}	{Sx[RA-226]}	{Sx[TH-232]}	{Sx[GlbResiduals]}
Запас точности	{AccurSurplus[Cs-137]}	{AccurSurplus[K-40]}	{AccurSurplus[RA-226]}	{AccurSurplus[TH-232]}	
Стат. неопред.	{USx[Cs-137]} (~<100*{USx[Cs-137]}/{CmpVal[Cs-137]}>~ %)	{USx[K-40]} (~<100*{USx[K-40]}/{CmpVal[K-40]}>~ %)	{USx[RA-226]} (~<100*{USx[RA-226]}/{CmpVal[RA-226]}>~ %)	{USx[TH-232]} (~<100*{USx[TH-232]}/{CmpVal[TH-232]}>~ %)	
Смещение	{Bias[Cs-137]} ({BiasPercent[Cs-137]})	{Bias[K-40]} ({BiasPercent[K-40]})	{Bias[RA-226]} ({BiasPercent[RA-226]})	{Bias[TH-232]} ({BiasPercent[TH-232]})	

{Warnings}

Критические параметры:

Запас точности. Превышение в процентах реальной точности (рассчитанной процедурой статистической обработки по выборке) относительно рассчитанной программой обработки спектра. **Допустимый диапазон:** от -20% до +100%.

Смещение. Отклонение среднего значения по выборке от аттестованного значения. **Допустимое значение:** <10 %.

Невязка. Расстояние от спектра модели до измеренного спектра нормированное на статистическое отклонение. **Допустимое значение:** < 2.

Протокол 3

{Program}
 {Analyser}
 Тракт {AnalNick}
 Геометрия: {Geometry}
 Проба: {Sample}, {SampleCode}
 {SampleNote}
 Время измерения {MeasTime}

Дата измерения	Загрузка (имп./с)	Левая гран. энергия (КэВ)	Правая гран. энергия (КэВ)	Интенсив- ность в окне (имп./с)	Невязка
<<{MeasDate}	{InputRate}	{LEnergy}	{REnergy}	{SumIntens}	{GlbResiduals}

>>

Кол-во записей	{N[InputRate]}	{N[LEnergy]}	{N[REnergy]}	{N[SumIntens]}	{N[GlbResiduals]}
Минимум	{XMin[InputRate]}	{XMin[LEnergy]}	{XMin[REnergy]}	{XMin[SumIntens]}	{XMin[GlbResiduals]}
Максимум	{XMax[InputRate]}	{XMax[LEnergy]}	{XMax[REnergy]}	{XMax[SumIntens]}	{XMax[GlbResiduals]}
Среднее	{XO[InputRate]}	{XO[LEnergy]}	{XO[REnergy]}	{XO[SumIntens]}	{XO[GlbResiduals]}
Ср. квадр. откл.	{Sx[InputRate]}	{Sx[LEnergy]}	{Sx[REnergy]}	{Sx[SumIntens]}	{Sx[GlbResiduals]}
Козфф. лин. составл. дисперсии (%)	{KDx[InputRate]}			{KDx[SumIntens]}	

Критические параметры:

Козфф. лин. составляющей дисперсии (%) для интенсивности в окне. Отклонение реальной статистики спектра от пуассоновской. **Допустимое значение:** < 2 %

Невязка. Расстояние от спектра модели до измеренного спектра нормированное на статистическое отклонение. **Допустимое значение:** < 2.

Протокол 4

{Program}
 {Analyser}
 Тракт {AnalNick}
 Геометрия: {Geometry}
 Проба: {Sample}, {SampleCode}
 {SampleNote}
 Время измерения {MeasTime}

Дата измерения	Коэффициент усиления	Нуль шкалы каналов	Энергия линии 1 (кэВ)	Разрешение линии 1 (кэВ)	Энергия линии 2 (кэВ)	Разрешение линии 2 (кэВ)	Дрейф разрешения (%)
<<{MeasDate}	{ADrift}	{BDrift}	{Line1En}	{Line1Width}	{Line2En}	{Line2Width}	{WDrift}

>>

Кол-во записей	{N[ADrift]}	{N[BDrift]}	{N[Line1En]}	{N[Line1Width]}	{N[Line2En]}	{N[Line2Width]}	{N[WDrift]}
Минимум	{XMin[ADrift]}	{XMin[BDrift]}	{XMin[Line1En]}	{XMin[Line1Width]}	{XMin[Line2En]}	{XMin[Line2Width]}	{XMin[WDrift]}
Максимум	{XMax[ADrift]}	{XMax[BDrift]}	{XMax[Line1En]}	{XMax[Line1Width]}	{XMax[Line2En]}	{XMax[Line2Width]}	{XMax[WDrift]}
Среднее	{XO[ADrift]}	{XO[BDrift]}	{XO[Line1En]}	{XO[Line1Width]}	{XO[Line2En]}	{XO[Line2Width]}	{XO[WDrift]}
Ср. квадр. откл.	{Sx[ADrift]}	{Sx[BDrift]}	{Sx[Line1En]}	{Sx[Line1Width]}	{Sx[Line2En]}	{Sx[Line2Width]}	{Sx[WDrift]}

Критические параметры:

Коэффициент усиления. Отклонение коэффициента преобразования (канал/кэВ) тракта от начального значения.
 Допустимый диапазон: 0.5 - 2.

Нуль шкалы каналов. Отклонение нуля шкалы канал/кэВ от начального значения.

Допустимый диапазон: -10% - +10% от числа каналов спектрометра.

Дрейф разрешения. Изменение разрешения спектрометра. Допустимое значение: < 100 %.

Протокол 5

{Program}
 {Analyser}
 Тракт {AnalNick}
 Геометрия: {Geometry}
 Проба: {Sample}, {SampleCode}
 {SampleNote}
 Время измерения {MeasTime}

Дата измерения	Загрузка (имп./с)	Левая гран. энергия (КэВ)	Правая гран. энергия (КэВ)	Интенсивность в окне (имп./с)	Невязка
<<{MeasDate}	{InputRate}	{LEnergy}	{REnergy}	{SumIntens}	{GlbResiduals}

>>

Кол-во записей	{N[InputRate]}	{N[LEnergy]}	{N[REnergy]}	{N[SumIntens]}	{N[GlbResiduals]}
Минимум	{XMin[InputRate]}	{XMin[LEnergy]}	{XMin[REnergy]}	{XMin[SumIntens]}	{XMin[GlbResiduals]}
Максимум	{XMax[InputRate]}	{XMax[LEnergy]}	{XMax[REnergy]}	{XMax[SumIntens]}	{XMax[GlbResiduals]}
Среднее	{XO[InputRate]}	{XO[LEnergy]}	{XO[REnergy]}	{XO[SumIntens]}	{XO[GlbResiduals]}
Ср. квадр. откл.	{Sx[InputRate]}	{Sx[LEnergy]}	{Sx[REnergy]}	{Sx[SumIntens]}	{Sx[GlbResiduals]}
Запас точности.	{AccurSurplus[InputRate]}			{AccurSurplus[SumIntens]}	
Кэфф. лин. составляющей дисперсии (%)	{KDx[InputRate]}			{KDx[SumIntens]}	

{Warnings}

Критические параметры:

Запас точности: Допустимое значение > -20%

Кэфф. лин. составляющей дисперсии (%) для интенсивности в окне. Отклонение реальной статистики фона от пуассоновской. Допустимое значение: < 10 %

Невязка. Расстояние от спектра модели до измеренного спектра нормированное на статистическое отклонение. Допустимое значение: < 1.5.

Протокол 6

{Program}
{Analyser}
 Тракт *{AnalNick}*
 Геометрия: *{Geometry}*
 Проба: *{Sample}*, *{SampleCode}*
{SampleNote}
 Время измерения *{MeasTime}*
 Масса пробы *{SampleMass}*

	Дата измерения	Активность нуклидов, {AUnit}			
		Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
<<{ SN }	<i>{MeasDate}</i>	{Act&Err[Cс-137]}	{Act&Err[K-40]}	{Act&Err[Ra-226]}	{Act&Err[Th-232]}
>>					
Число записей		{N[Cс-137]}	{N[K-40]}	{N[Ra-226]}	{N[Th-232]}
Минимальное значение		{XMin[Cс-137]} ±{GMin[Cс-137]}	{XMin[K-40]} ±{GMin[K-40]}	{XMin[Ra-226]} ±{GMin[Ra-226]}	{XMin[Th-232]} ±{GMin[Th-232]}
Максимальное значение		{XMax[Cс-137]} ±{GMax [Cс-137]}	{XMax [K-40]} ±{GMax [K-40]}	{XMax [Ra-226]} ±{GMax [Ra-226]}	{XMax [Th-232]} ±{GMax [Th-232]}
Среднее		{X0[Cс-137]} ±{G0[Cс-137]}	{X0[K-40]} ±{G0[K-40]}	{X0[Ra-226]} ±{G0[Ra-226]}	{X0[Th-232]} ±{G0[Th-232]}
Средне-квадратичное отклонение		{Sx[Cс-137]}	{Sx[K-40]}	{Sx[Ra-226]}	{Sx[Th-232]}
Запас точности		{AccurSurplus[Cс-137]}	{AccurSurplus[K-40]}	{AccurSurplus[RA-226]}	{AccurSurplus[TH-232]}
МИА (Расчёт по ср. кв. откл.)		~<2*{USx[Cс-137]}>~	~<2*{USx[K-40]} >~	~<2*{USx[Ra-226]} >~	~<2*{USx[Th-232]} >~

{Warnings}

Критические параметры:

Запас точности. Превышение в процентах реальной точности (рассчитанной процедурой статистической обработки по выборке) относительно рассчитанной программой обработки спектра. **Допустимый диапазон: от -20% до +100%.**

МИА (Расчёт по ср. кв. откл.). Минимально измеряемая активность, рассчитанная по формуле $MIA = 2 \cdot Usx$, где Usx - неопределённость оценок активностей при обработке спектров фоновых проб.

МИА приведена для времени измерения =*{MeasTime}*.

Примеры оформленных протоколов поверки

Протокол 2-гамма

"СПЕКТР" Версия 59.17.0

Универсальный спектрометрический комплекс УСК "Гамма плюс",

заводской номер 9819-Ар-Б-Г

Тракт ГАММА-2017

Геометрия: КИ

Проба: Контр. ист Cs-137+K-40 № 1693 Cs-137 = 1500, K-40 = 16000 Бк, КИ № 1693-2017

Контрольный источник Cs-137+K-40

№ 1693-2017

Акт Cs-137 = 1500 Бк.

Акт K-40 = 16000 Бк.

Масса пробы 1000 г

Время измерения 150.6

Дата измерения	Дата значения активностей	Cs 137 Бк/кг	K 40 Бк/кг	Невязка
21.05.2021 11:50	02.06.2017 12:00	1510±28	16100±500	1.45932
20.05.2021 09:11	02.06.2017 12:00	1521±26	15800±500	1.42142
18.05.2021 13:50	02.06.2017 12:00	1512±35	15500±500	1.52919
18.05.2021 10:24	02.06.2017 12:00	1497±35	16080±450	1.37767
13.05.2021 12:24	02.06.2017 12:00	1518±25	16100±500	1.32811
11.05.2021 10:22	02.06.2017 12:00	1514±28	15800±500	1.39604
28.04.2021 11:27	02.06.2017 12:00	1519±35	16100±500	1.40832
21.04.2021 10:02	02.06.2017 12:00	1534±35	15960±450	1.35343
16.04.2021 10:29	02.06.2017 12:00	1506±35	16100±500	1.39368
14.04.2021 11:01	02.06.2017 12:00	1540±40	16000±500	1.44711
12.04.2021 12:53	02.06.2017 12:00	1508±35	16080±450	1.36457
12.04.2021 09:28	02.06.2017 12:00	1508±27	15900±500	1.43339

Данные сравнения		1500±70	16000±800	
Кол-во записей		12	12	12
Минимум		1497 ±35	15500 ±500	1.32811
Максимум		1540 ±40	16100 ±500	1.52919
Среднее		1516 ±32.3	15960 ±488	1.40935
Ср. квадр. откл.		12	185	0.0541
Запас точности		49 %	33 %	
Стат. неопред.		24 (1.6 %)	369 (2.30625 %)	
Смещение		16 (1.06667 %)	40 (0.25 %)	

Критические параметры:

Запас точности. Превышение в процентах реальной точности (рассчитанной процедурой статистической обработки по выборке) относительно рассчитанной программой обработки спектра. **Допустимый диапазон:** от -20% до +100%.

Смещение. Отклонение среднего значения по выборке от аттестованного значения. **Допустимое значение:** <10 %.

Невязка. Расстояние от спектра модели до измеренного спектра нормированное на статистическое отклонение.

Допустимое значение: < 2.

Протокол 3-гамма

"СПЕКТР" Версия 59.17.0

Универсальный спектрометрический комплекс УСК "Гамма плюс",

заводской номер 9819-Ар-Б-Г

Тракт ГАММА-2017

Геометрия: КИ

Проба: Контр. ист Cs-137+K-40 № 1693 Cs-137 = 1500, K-40 = 16000 Бк, КИ № 1693-2017

Контрольный источник Cs-137+K-40

№ 1693-2017

Акт Cs-137 = 1500 Бк.

Акт K-40 = 16000 Бк.

Время измерения 150.6

Дата измерения	Загрузка (имп./с)	Левая гран. энергия (КэВ)	Правая гран. энергия (КэВ)	Интенсив- ность в окне (имп./с)	Невязка
21.05.2021 11:50	339.145	200	3189.51	292.138	1.45932
20.05.2021 09:11	338.627	200	3300	291.25	1.42142
18.05.2021 13:50	336.958	200	3180.77	290.397	1.52919
18.05.2021 10:24	340.213	200	3212.37	292.323	1.37767
13.05.2021 12:24	341.939	200	3232.1	295.049	1.32811
11.05.2021 10:22	339.325	200	3233.77	292.348	1.39604
28.04.2021 11:27	341.61	200	3223.01	292.813	1.40832
21.04.2021 10:02	342.081	200	3243.15	294.002	1.35343
16.04.2021 10:29	341.457	200	3226.58	293.709	1.39368
14.04.2021 11:01	344.882	200	3235.43	295.047	1.44711
12.04.2021 12:53	341.53	200	3226.28	293.891	1.36457
12.04.2021 09:28	340.786	200	3233.77	290.529	1.43339

Кол-во записей	12	12	12	12	12
Минимум	336.958	200	3180.77	290.397	1.32811
Максимум	344.882	200	3300	295.049	1.52919
Среднее	340.713	200	3228.06	292.791	1.40935
Ср. квадр. откл.	2.04	0	29.4	1.59	0.0541
Кэфф. лин. составл. дисперсии (%)	0.4			0.26	

Критические параметры:

Кэфф. лин. составляющей дисперсии (%) для интенсивности в окне. Отклонение реальной статистики спектра от пуассоновской. Допустимое значение: < 2 %

Невязка. Расстояние от спектра модели до измеренного спектра нормированное на статистическое отклонение.

Допустимое значение: < 2.

Протокол 4-гамма

"СПЕКТР" Версия 59.17.0

Универсальный спектрометрический комплекс УСК "Гамма плюс",

заводской номер 9819-Ар-Б-Г

Тракт ГАММА-2017

Геометрия: КИ

Проба: Контр. ист Cs-137+K-40 № 1693 Cs-137 = 1500, K-40 = 16000 Бк, КИ № 1693-2017

Контрольный источник Cs-137+K-40

№ 1693-2017

Акт Cs-137 = 1500 Бк.

Акт K-40 = 16000 Бк.

Время измерения 150.6

Дата измерения	Коэффициент усиления	Нуль шкалы каналов	Энергия линии 1 (кэВ)	Разрешение линии 1 (кэВ)	Энергия линии 2 (кэВ)	Разрешение линии 2 (кэВ)	Дрейф разрешения (%)
21.05.2021 11:50	1.444	38.8	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
20.05.2021 09:11	1.423	39	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
18.05.2021 13:50	1.454	38.6	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
18.05.2021 10:24	1.429	38.8	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
13.05.2021 12:24	1.419	39.2	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
11.05.2021 10:22	1.419	38.7	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
28.04.2021 11:27	1.419	38.7	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
21.04.2021 10:02	1.414	38.8	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
16.04.2021 10:29	1.418	38.8	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
14.04.2021 11:01	1.415	38.3	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
12.04.2021 12:53	1.415	38.8	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
12.04.2021 09:28	1.413	37.9	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97

Кол-во записей	12	12	12	12	12	12	12
Минимум	1.413	37.9	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
Максимум	1.454	39.2	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
Среднее	1.4235	38.7	661.534	44.9665	2614.41	89.4821	0.97
Ср. квадр. откл.	0.0129	0.33	0	0	0	0	0

Критические параметры:

Коэффициент усиления. Отклонение коэффициента преобразования (канал/кэВ) тракта от начального значения.

Допустимый диапазон: 0.5 - 2.

Нуль шкалы каналов. Отклонение нуля шкалы канал/кэВ от начального значения.

Допустимый диапазон: -10% - +10%. от числа каналов спектрометра.

Дрейф разрешения. Изменение разрешения спектрометра. **Допустимое значение:** < 100 %.

Протокол 5-гамма

"СПЕКТР" Версия 59.17.0

Универсальный спектрометрический комплекс УСК "Гамма плюс",

заводской номер 9819-Ар-Б-Г

Тракт ГАММА-2017

Геометрия: КИ

Проба: Эон

Эон

Время измерения 1800.9

Дата измерения	Загрузка (имп./с)	Левая гран. энергия (КэВ)	Правая гран. энергия (КэВ)	Интенсивность в окне (имп./с)	Невязка
18.05.2021 10:28	9.83727	230	3300	8.51786	1.35166
11.05.2021 10:30	9.68726	230	3300	8.41881	1.29005
21.04.2021 10:06	10.0234	230	3300	8.69926	1.39053
16.04.2021 10:33	9.78183	230	3300	8.4831	1.42635
14.04.2021 11:07	9.82056	230	3300	8.4948	1.29109
12.04.2021 12:57	9.836	230	3300	8.551	1.3
12.04.2021 09:32	9.77317	230	3300	8.47323	1.41226
31.03.2021 12:06	9.85061	230	3300	8.48965	1.27899
29.03.2021 11:08	9.69538	230	3300	8.33455	1.26476
26.03.2021 10:04	9.90089	230	3300	8.53432	1.32388
19.03.2021 09:47	10.0245	230	3300	8.6686	1.41701
18.03.2021 13:56	9.93864	230	3300	8.58337	1.28702
16.03.2021 10:27	9.76662	230	3300	8.4377	1.22753
12.03.2021 10:00	9.85035	230	3300	8.48452	1.29273

Кол-во записей	14	14	14	14	14
Минимум	9.68726	230	3300	8.33455	1.22753
Максимум	10.0245	230	3300	8.69926	1.42635
Среднее	9.84189	230	3300	8.5122	1.32528
Ср. квадр. откл.	0.103	0	0	0.0946	0.0633
Запас точности.	376 %			355 %	
Кэфф. лин. составляющей дисперсии (%)	0.73			0.76	

Критические параметры:

Запас точности: Допустимое значение > -20%

Кэфф. лин. составляющей дисперсии (%) для интенсивности в окне. Отклонение реальной статистики фона от пуассоновской. Допустимое значение: < 10 %

Невязка. Расстояние от спектра модели до измеренного спектра нормированное на статистическое отклонение. Допустимое значение: < 1.5.

Протокол 6-гамма

"СПЕКТР" Версия 59.17.0

Универсальный спектрометрический комплекс УСК "Гамма плюс",

заводской номер 9819-Ар-Б-Г

Тракт ГАММА-2017

Геометрия: Сосуд "Маринелли" 1 литр.

Проба: Эон

Эон

Время измерения 1800.9

Масса пробы 1 кг

	Дата измерения	Активность нуклидов, Бк/кг			
		Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
1	18.05.2021 10:28	0.8±2.8	-10±40	0.7±2.2	0±2.2
2	11.05.2021 10:30	0.3±2.5	-3±35	-0.1±2.6	-0.6±1.9
3	21.04.2021 10:06	0.9±2.5	4±35	0.8±2.7	-0.2±1.9
4	16.04.2021 10:33	-0.2±2.4	-10±35	-0.8±2.6	1.1±1.9
5	14.04.2021 11:07	-1±2.4	8±35	0.2±2.7	-0.4±1.9
6	12.04.2021 12:57	-1±2.7	0±40	1±3	-0.2±2.1
7	12.04.2021 09:32	0.9±2.7	-10±40	-1.3±2.8	1.2±2.1
8	31.03.2021 12:06	-1.1±2.6	10±40	-1.3±2.9	0.7±2.1
9	29.03.2021 11:08	1±2.7	-20±40	-0.5±2.9	0±2.1
10	26.03.2021 10:04	-0.6±2.7	-20±40	1.8±2.9	-0.5±2.1
11	19.03.2021 09:47	0.2±2.8	0±40	1±3	-0.5±2.1
12	18.03.2021 13:56	0.6±2.8	-20±40	1±3	0.4±2.1
13	16.03.2021 10:27	0.8±2.7	-20±40	-1.5±2.9	1.3±2.1
14	12.03.2021 10:00	-0.2±2.7	-30±40	0.2±2.9	0.9±2.1

Число записей	14	14	14	14
Минимальное значение	-1.1 ±2.6	-30 ±40	-1.5 ±2.9	-0.6 ±1.9
Максимальное значение	1 ±2.7	10 ±40	1.8 ±2.9	1.3 ±2.1
Среднее	0.1 ±0.7	-9 ±10	0.1 ±0.7	0.2 ±0.5
Средне-квадратичное отклонение	0.78	12.2	1.03	0.689
Запас точности	67 %	59 %	37 %	47 %
МИА (Расчёт по ср. кв. откл.)	3.12	49	4.14	2.76

Критические параметры:

Запас точности. Превышение в процентах реальной точности (рассчитанной процедурой статистической обработки по выборке) относительно рассчитанной программой обработки спектра. **Допустимый диапазон: от -20% до +100%.**

МИА (Расчёт по ср. кв. откл.). Минимально измеряемая активность, рассчитанная по формуле $MIA = 2 \cdot U_{sx}$, где U_{sx} - неопределённость оценок активностей при обработке спектров фоновых проб.

МИА приведена для времени измерения =1800.9.