

**ГЦИ СИ ВНИИМ им. Д. И. Менделеева
ООО «Нефтегазгеофизика»**

**ИНСТРУКЦИЯ
по проведению спектрометрического гамма-каротажа
аппаратурой СГК-1024 и обработке результатов измерений
МИ 41-17-1396-04**

Тверь-2004

Предисловие

1 РАЗРАБОТАНА ООО «Нефтегазгеофизика»

Исполнители: Велижанин В.А., Головацкий С.Ю.,
Пантюхин В.А., Саранцев С.Н., Хаматдинов Р.Т.,
Черменский В.Г.

2 СОГЛАСОВАНА Заместителем руководителя ГЦИ СИ ВНИИМ

им. Д. И. Менделеева Александровым В. С.
Генеральным директором ООО «Уральский центр
стандартизации и сертификации геофизической и
геологической продукции Талалаем А. Г.

3 УТВЕРЖДЕНА Генеральным директором ООО «Нефтегазгеофизика»

Хаматдиновым Р. Т.

4 РАЗРАБОТАНА ВПЕРВЫЕ

Настоящая инструкция не может быть полностью или частично
воспроизведена, тиражирована и распространена без разрешения ООО
«Нефтегазгеофизика»

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	1
1. Общие положения	2
2. Характеристика аппаратуры	8
2.1. Состав аппаратуры	8
2.2. Техническая характеристика аппаратуры	8
2.3. Конструкция скважинного прибора	9
2.4. Схема функционирования скважинного прибора	10
2.5. Характеристика программного обеспечения аппаратуры	13
3. Методика калибровки аппаратуры	14
3.1. Базовая калибровка аппаратуры	14
3.2. Полевая калибровка аппаратуры	16
4. Методика скважинных измерений	17
4.1. Регистрируемые параметры	17
4.2. Дискретность данных по глубине, скорость каротажа	17
4.3. Порядок работы на скважине	18
4.4. Оформление и контроль качества измерений	20
5. Обработка результатов измерений СГК	22
5.1. Определение границ пластов и снятие отсчетов с кривых СГК	22
5.2. Расчет массовых содержаний тория, урана и калия	22
5.3. Учет влияния условий измерений в скважине на результаты СГК	25
5.4. Технология проведения первичной обработки спектрометрического гамма-каротажа	25
5.5. Информационные возможности спектрометрического гамма-каротажа	29
6. Характеристика программного обеспечения первичной обработки	33
Список литературы	38
Приложение 1	39
Приложение 2	40
Приложение 3	43
Приложение 4	45

ИНСТРУКЦИЯ
по проведению спектрометрического гамма-каротажа аппаратурой
СГК-1024 и обработке результатов измерений
МИ 41-17-1396-04

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая инструкция регламентирует методику выполнения измерений и обработку результатов измерений при проведении спектрометрического гамма каротажа аппаратурой СГК-1024Т и СГК-1024Т-2Т (в дальнейшем – аппаратура СГК-1024, кроме случаев, оговоренных особо). Здесь и далее под аппаратурой СГК понимается информационно-измерительный комплекс, обеспечивающий измерение массовых содержаний тория C_{Th} , урана C_U и калия C_K , а также естественной активности пород методом спектрометрического гамма-каротажа. Аппаратура СГК-1024 предназначена для исследования необсаженных и обсаженных нефтяных и газовых скважин.

В инструкции приведены физические основы метода, технические характеристики аппаратуры, изложены методики калибровки, проведения каротажа и обработки результатов измерений, алгоритмы и зависимости для учета влияния геолого-технических факторов на результаты каротажа. Инструкция предназначена для инженерно-технических работников, использующих аппаратуру СГК-1024.

Аппаратура СГК-1024 предназначена для проведения спектрометрического гамма-каротажа естественной радиоактивности породы с получением массовых содержаний тория C_{Th} , урана C_U и калия C_K . Аппаратура выпускается в обычном (120°C, 80 МПа, СГК-1024Т) и термобаростойком (175°C, 140 МПа, СГК-1024Т-2Т) исполнениях. В зависимости от условий применения и требований к точности измерений допустимая скорость каротажа изменяется в пределах 50÷200 м/час.

Инструкция составлена по данным научно-исследовательских и опытно-методических работ и содержит сведения, необходимые для ознакомления с технологией производства работ аппаратурой СГК-1024, а именно: проведения базовой и полевой калибровок, настройки аппаратуры перед каротажем, выполнения работ в скважине, обработки результатов измерений и их комплексирования с данными других методов. Подробное описание перечисленных выше элементов технологии работ с аппаратурой СГК-1024 поставляется вместе с программным обеспечением, реализующим соответствующий технологический этап.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Спектрометрический гамма-каротаж (СГК) основан на регистрации гамма-излучения естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), содержащихся в горных породах. Поток и энергетический спектр регистрируемого гамма-излучения определяются массовой концентрацией, составом и пространственным распределением ЕРЭ, плотностью породы и ее эффективным атомным номером $Z_{эф}$. В формировании энергетического спектра СГК в основном участвуют гамма-излучения изотопов уранового и ториевого рядов, а также изотопа калий-40.

Возможность определения массовых содержаний тория, урана и калия по данным СГК основана на индивидуальных особенностях спектров гамма-излучения этих элементов, при этом считается, что торий и уран находятся в равновесном состоянии с продуктами распада. Спектры гамма-излучения естественных радиоактивных элементов характеризуются набором линий определенной энергии и интенсивности. В табл. 1 приведены основные линии гамма-излучения тория, урана и калия [1, 2].

Таблица 1 - основные линии гамма-излучения тория, урана и калия

Элемент	Энергия гамма-квантов, КэВ	Интенсивность линии, отн. ед.
Калий	1460	1.00
Уран	2198	0.28
	1762	1.00
	609	2.56
	350	1.74
Торий	2620	1.00
	907	0.74
	582	0.80
	238	1.31

Проходя через породу, скважину и охранный кожух прибора гамма-кванты частично поглощаются, частично рассеиваются с потерей энергии. В результате на детектор поступает спектр гамма-излучения, существенно отличающийся от первичного спектра. Энергия, оставленная гамма-квантом в детекторе, преобразуется блоком детектирования в электрический импульс, заряд которого пропорционален суммарной энергии, оставленной гамма-квантом в детекторе. Спектр (распределение по амплитуде) электрических импульсов, регистрируемых прибором, называется аппаратным спектром. Примеры таких спектров в моделях с преимущественно ториевой, урановой и калиевой активностью приведены на рис.1.

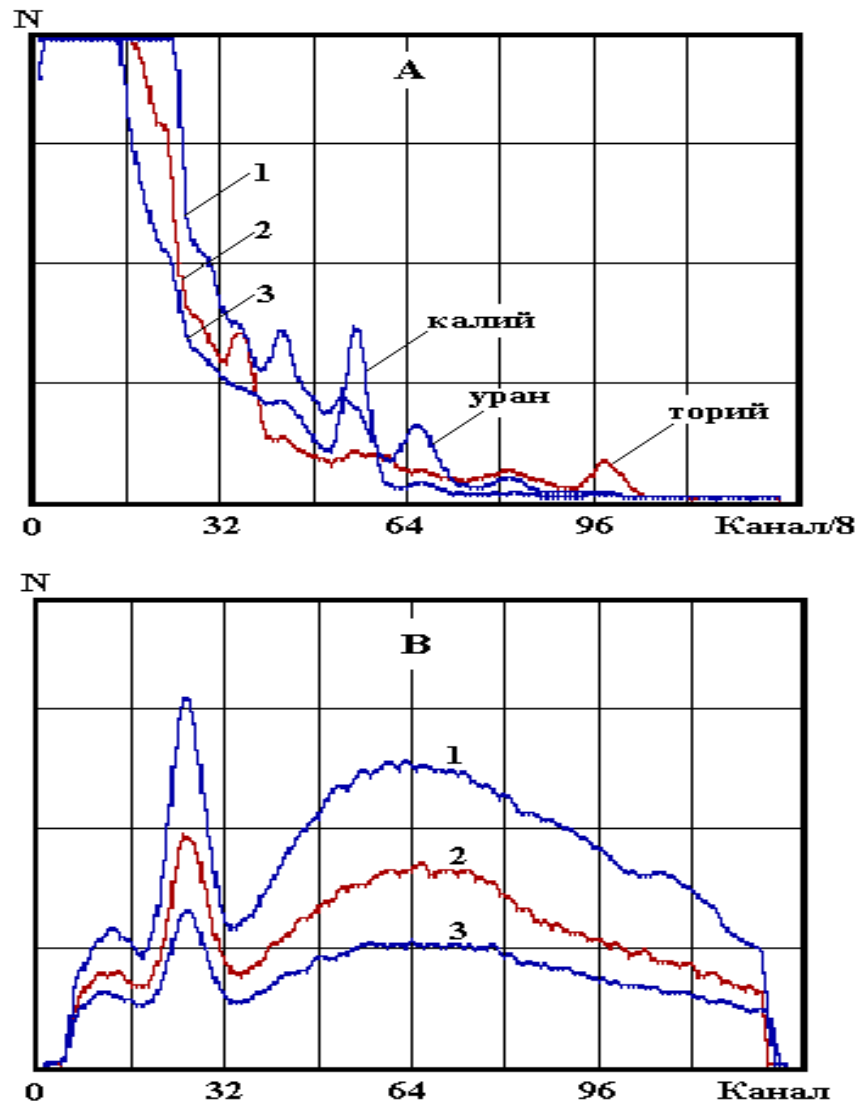


Рис. 1. Аппаратурные спектры в моделях с ториевой, урановой и калиевой активностью
1 – урановый спектр (уран – линия урана 1762 КэВ), 2 – ториевый спектр (торий – линия тория 2620 КэВ), 3 – калиевый спектр (калий – линия калия 1460 КэВ). В – “мягкая” часть спектров (первые 128 каналов 1024 канальных спектров).

Из приведенных рисунков видна ярко выраженная индивидуальность спектров Th, U и K. Это их свойство используется при разложении зарегистрированных в процессе каротажа спектров на три составляющие. Коэффициентами этого разложения являются массовые содержания тория, урана и калия в породе при совпадении скважинных условий проведения каротажа с условиями регистрации опорных (калибровочных) спектров. В противном случае для правильного определения массовых содержаний Th, U и K необходимо учитывать влияние скважинных условий измерений.

Связь массовых содержаний Th, U и K и исправленных за влияние скважинных условий измерений показаний интегрального ГК $J_{ГК}$ выражается соотношением

$$J_{ГК} = (C_{Th} \times P_{Th} + C_U \times P_U + C_K \times P_K) \times P_{SRS},$$

где C_{Th} , C_U , C_K – массовые доли тория, урана и калия, P_{Th} , P_U , P_K – коэффициенты, выражающие связь эту связь. Для аппаратуры СГК-1024Т значения этих коэффициентов равны

$$P_{Th} = 0.43 \text{ мкР/час}/10^{-4} \%,$$

$$P_U = 1.00 \text{ мкР/час}/10^{-4} \%,$$

$$P_K = 1.99 \text{ мкР/час}/\%,$$

для аппаратуры СГК-1024Т-2Т

$$P_{Th} = 0.45 \text{ мкР/час}/10^{-4} \%,$$

$$P_U = 1.16 \text{ мкР/час}/10^{-4} \%,$$

$$P_K = 2.44 \text{ мкР/час}/\%.$$

P_{SRS} – множитель, учитывающий условия калибровки интегрального канала ГК. Его значение равно 0.9 для калибровочных источников типа С-41 и 1.0 для источников типа ЕР.

В табл. 2 приведены некоторые области применения СГК по данным источников [2, 3, 4].

Таблица 2 - применение спектрометрии естественной гамма-активности пород

Объекты	Область применения
Терригенные отложения	Корреляции разрезов скважин. Детальное литологическое расчленение. Стратиграфические исследования. Определение/уточнение фильтрационно-емкостных свойств. Определение/уточнение минерального состава пород. Контроль обводнения.
Карбонатные отложения	Корреляции литологических изменений. Выделение проницаемых интервалов, зон трещиноватости. Определение/уточнение минерального состава пород. Контроль обводнения.

Основой использования массовых содержаний Th, U и K в породах для решения перечисленных в табл. 2 задач является широкий диапазон изменения их содержаний, с одной стороны, и приуроченность определенных концентрационных конфигураций массовых содержаний Th, U, K к конкретным породам, условиям осадконакопления, вторичным процессам и др., с другой стороны. Причиной всему этому является геохимия этих элементов и их подвижность. В табл. 3 приведены содержания тория, урана и калия в некоторых породах и минералах [3].

Таблица 3 - содержание калия, урана и тория в некоторых породах (по В. Фертлу, 1979 г.)

Породы, минерал	K, %	U, ppm	Th, ppm
Акцессорные минералы:			
алланит	-	30-700	500-5000
апатит	-	5-150	20-150
эпидот	-	20-50	50-500
монацит	-	500-3000	2500-20000
сфен	-	100-700	100-600
ксенотим	-	500-34000	Низкое
циркон	-	300-3000	100-2500
Базальты:			
щелочной базальт	0.61	0.99	4.6
платобазальт	0.61	0.53	1.96
щелочной оливиновый базальт	<1.4	<1.4	3.9
толеит орогенный	<0.6	<0.25	<0.05
толеит неорогенный	<1.3	<0.5	<2
Карбонаты (чистые):			
кальцит, мел, известняк, доломит	<0.1	<1	<0.5
диапазоны изменения (средние значения)	0.0-2.0(0.3)	0.1-9 (2,2)	0.1-7(1.7)
Глинистые минералы:			
боксит	-	3-30	10-130
глауконит	5.08-5.30	-	-
бентонит	<0.5	1-20	6-50
монтмориллонит	0.16	2-5	14-24
каолинит	0.42	1.5-3	6-19
иллит	4.5	1.5	-
Группа слюд:			
биотит	6.7-8.3	-	<0.01
мусковит	7.9-9.8	-	<0.01

Окончание таблицы 3

Полевые шпаты:			
плагиоклаз	0.54	-	<0.01
ортоклаз	11.8	-	<0.01
микроклин	10.9	-	<0.01
Габбро (железосиликатная изверженная порода)	0.46-0.58 2.75-4.26	0.84-0.9 3.6-4.7	2.7-3.85 19-20
Граниты (кислая магнетическая порода):			
Гранодиориты	2-2.5	2.6	9.3-11
Битуминозные сланцы	<4.0	500	1-30
Перидодит	0.2	0.01	0.05
Фосфаты	-	100-350	1-5
Липарит	4.2	5	-
Песчаники	0.7-3.8 (1.1)	<0.4	<0.2
Кремнезем, кварц, кварцит (чистые)	<0.15	<0.4	<0.2
Глинистые сланцы обычные (средние значения)	1.6-4.2 (2.7)	1.5-5.5 (3.7)	8-18 (12)
Кристаллический сланец (биотит)	-	2.4-4.7	13-25
Сиенит	2.7	2500	1300
Туф (полевошпатовый)	2.04	5.96	1.57

Калий. Средняя массовая концентрация калия в земной коре равна 2.59 % [4]. Источником калия являются силикатные магматические породы, а именно: граниты, сиениты, риолиты и др. Калий в эти породы входит в составе калиевых полевых шпатов (ортоклаз, микроклин), слюд (мусковит, биотит, иллит и др.) и некоторых других глинистых минералов (монтмориллонит, хлорит, каолинит) [4]. Содержание калия в некоторых породообразующих минералах приведено в табл. 4.

Таблица 4 - содержание калия в кристаллической решетке породообразующих минералов осадочных пород

Минерал	Химическая формула	Содержание калия, %
Мусковит	$KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$	9.8
Биотит	$K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}](OH)_2$	8.7
Флогопит	$KMg_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$	9.3-9.4
Ортоклаз	$K[AlSi_3O_8]$	14.0
Сильвин	KCl	52.4

В процессе химического преобразования основная часть калия, входящая в состав магматических пород, растворяется в воде. Имея слабый ионный

потенциал, калий долго остается в растворе и в процессе переноса в значительной своей части абсорбируется на глинистых минералах.

Торий. Среднее содержание тория в земной коре составляет 12 ppm [4]. Источником тория также являются магматические силикатные породы. В процессе химического преобразования торий легко гидролизуется и поэтому обладает ограниченной подвижностью. Кроме того, торий имеет тенденцию концентрироваться в глинистых минералах. Из-за своего большого ионного радиуса торий хорошо фиксируется между слоями при абсорбции глинистыми минералами. Его количество зависит от pH и относительного содержания других катионов. Из-за своей нерастворимости торий всегда транспортируется в виде суспензий, где концентрируется в тонкодисперсных частицах в виде ториевых минералов или торийнесущих акцессорных минералов.

Уран. Среднее содержание урана в земной коре около 3 ppm. Материнскими породами урана являются силикатные магматические горные породы, в которых уран содержится в ограниченном количестве акцессорных минералов [4]. Основой геохимии урана является его легкое окисление и переход в растворимое состояние. Как следствие этого – высокая подвижность урана. Уран ассоциируется и с обломками пород и с хемогенными осадками.

Содержание тория и урана в некоторых акцессорных минералах приведено в табл. 5.

Таблица 5 - содержание тория и урана в акцессорных минералах

Минерал	Торий, ppm	Уран, ppm
Циркон	100-2500	300-3000
Монацит	2500-20000	500-3000
Сфен	100-600	100-700
Апатит	20-150	5-150
Епидот	50-500	20-50
Алланит	500-5000	30-700

Таким образом, в осадочных породах калий в основном встречается в глинистых минералах, калиевых полевых шпатах и слюдах. Торий, кроме глинистых минералов, в большом количестве может содержаться в тяжелых минералах. Поведение урана зависит от большого числа факторов и напрямую не контролируется глинистыми частицами. Из сказанного следует, что для интерпретации данных спектрометрического гамма-каротажа важной составляющей являются построение интерпретационной модели объекта исследования и установление/уточнение петрофизических связей C_{Tb} , C_U , C_K в рамках этой модели. Несколько подробнее это рассмотрено в разделе 5.5.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА АППАРАТУРЫ

2.1 Состав аппаратуры

В состав аппаратуры СГК-1024 входят:

- скважинный прибор;
- техническое описание (ТО);
- формуляр;
- интерпретационное обеспечение метода СГК;
- программно-методическое обеспечение первичной обработки данных СГК (получение исправленных за влияние скважинных условий измерений геофизических параметров – массовых содержаний тория S_{Th} , урана S_U и калия S_K в породе), инструкция по ее проведению;
- программное обеспечение настройки и тестирования прибора на базе (для ремонтных служб предприятия);
- программное обеспечение тестирования прибора перед каротажем (для операторского состава);
- программное обеспечение полевой калибровки и инструкция по ее проведению;
- технические средства и программное обеспечение базовой калибровки, инструкция по ее проведению;
- программное обеспечение проведения каротажа аппаратурой СГК-1024.

Аппаратура работает в комплексе с регистрирующим оборудованием, обеспечивающим прием-передачу информации в коде Манчестер-2 и управление режимами работы прибора в процессе каротажа, каротажной станцией с трехжильным грузонесущим кабелем длиной до 8000м.

Программные средства настройки, тестирования, калибровки и регистрации данных аппаратуры СГК-1024 функционируют в составе регистратора “КАРАТ” либо модема, обеспечивающих связь прибора с компьютером.

Комплектность поставки технических и программных средств определяется требованиями заказчика.

Подробные сведения об аппаратуре приведены в техническом описании и инструкции по эксплуатации.

2.2 Техническая характеристика аппаратуры

Аппаратура СГК-1024 характеризуется следующими параметрами:

– длина, мм		1550 (2290)
– максимальный диаметр, мм		73 (76)
– масса, кг		25 (50)
– диапазон диаметров исследуемых скважин, мм		≥ 100
– скорость каротажа, м/ч		до 200
– телеметрия		Манчестер-2, 22 кбод
– диапазон энергий, КэВ		40÷3000
– тип детектора		CsJ, NaJ
– число регистрируемых каналов		2×128+16 (17)
– число измеряемых параметров		10
– диапазон измерений массовых содержаний		
	тория, ppm	0.5÷200
	урана, ppm	0.5÷200
	калия, %	0.1÷20
– погрешность измерений массовых содержаний		
	тория, ppm	1.5 (10 % отн.)
	уран, ppm	1.5 (10% отн.)
	калия, %	0.3 (10%отн.)
– канал интегрального ГК, мкР/ч		0.1÷250
– основная относительная погрешность измерений ГК, %		15
– канал акселерометра		Не нормирован
– канал внутренней температуры прибора		Не нормирован
– 4 технологических канала		Не нормированы
– диапазон рабочих температур, °С		-10 ÷120 (-10 ÷175)
– верхнее значение рабочего гидростатического давления, МПа		80 (140)

В скобках приведены значения для термобаростойкой аппаратуры.

2.3 Конструкция скважинного прибора

Общий вид скважинного прибора в модификации СГК-1024Т приведен на рис. 2, основными элементами которого являются: приборная головка (1), охранный кожух (2), блок детектирования СГК (3), блок электроники (4) и проходная головка с накидной гайкой и пробкой. В приборной головке установлены геофизический разъем и переходной мост с электровводами. В проходной головке установлен стандартный геофизический разъем. В термобаростойкой модификации аппаратуры блоки детектирования и электроники размещаются в металлическом сосуде Дьюара.



Рис. 2. Основная ось скважинного прибора СГК-1024Т

- 1 – приборная головка,
2 – охранный кожух, 3 – блок детектирования,
4 – блок электроники.

(предназначен для питания ФЭУ);

10 – проходной разъем (к нему происходит подсоединение последующих модулей);

11 – охранный кожух скважинного прибора.

2.4 Схема функционирования скважинного прибора

Скважинный прибор содержит электронный блок, телесистему и сцинтилляционный детектор гамма-излучения с фотоэлектронным умножителем. Работа спектрометрической схемы стабилизируется по опорному калибровочному спектру.

Блок-схема скважинного прибора СГК-1024Т приведена на рис. 3. Прибор состоит из следующих блоков:

1 – разъем головки скважинного прибора (к нему происходит подсоединение трех жил и брони каротажного геофизического кабеля);

2 – блок коммутации (предназначен для подключения прибора к первой и второй жилам кабеля в случае подачи 24 В по третьей жиле);

3 – блок центрального процессора (служит для связи скважинного прибора с бортовым компьютером и одновременно буферизирует данные для передачи по кабелю);

4 – блок преобразования вторичных напряжений (предназначен для получения внутри скважинного прибора требуемых вторичных напряжений, ± 5 В, ± 12 В, +24 В);

5 – блок накопления амплитудных спектров;

6 – блок преобразования «аналог-код» (предназначен для оцифровки входных импульсов с системы «ФЭУ+детектор»);

7 – фотоэлектронный умножитель;

8 – детектор гамма-излучения;

9 – блок питания высокого напряжения

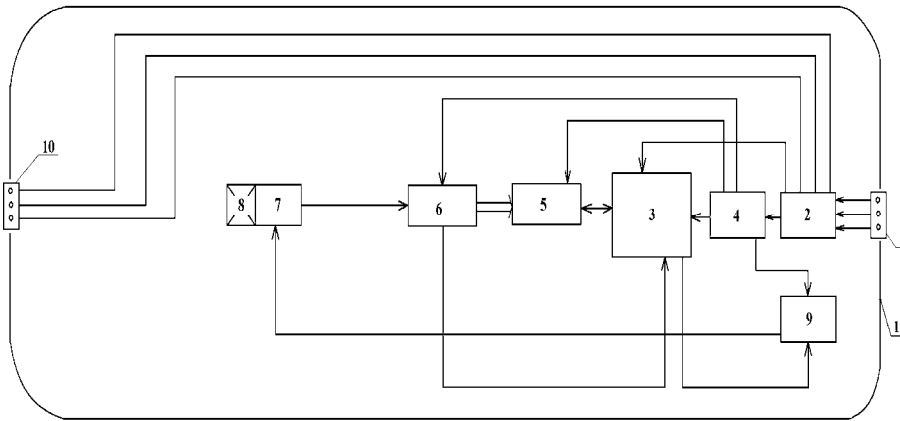


Рис. 3. Блок-схема скважинного прибора SGK-1024Т

Скважинный прибор работает следующим образом. К каротажной станции скважинный прибор подключается через геофизический каротажный кабель, сочлененный с головкой скважинного прибора (1). В положении «по умолчанию» первая и вторая жилы кабеля проходят транзитом на проходной разъем (10) и не имеют гальванической связи с электронными блоками спектрометра. Это предназначено для возможности подключения этих жил к другим устройствам, например, к электродвигателю. Подача на третью жилу каротажного кабеля +24В относительно брони коммутирует 1 и 2 жилы к электронному блоку спектрометра. При подаче питания скважинного прибора начинает работать блок преобразования вторичных напряжений (4) и блок питания высокого напряжения (9). При появлении вторичных напряжений внутри скважинного прибора блок центрального процессора (3) сбрасывает в состояние «по умолчанию» блок накопления амплитудно-временных спектров (5), блок преобразования «аналог-код» (6) и блок питания высокого напряжения (9). Блок питания высокого напряжения программно-управляемый – т.е. его выходным напряжением, которое запитывает ФЭУ (7), можно управлять по командам с наземного компьютера, изменяя тем самым коэффициент усиления информационного сигнала. При установке «по умолчанию» напряжение питания ФЭУ (7) устанавливается блоком питания высокого напряжения (9) на значение, полученное по результатам настройки скважинного прибора. Обычно при температуре 20°C состояние «по умолчанию» обеспечивает положение энергетической шкалы скважинного прибора в заданной рабочей области.

В результате взаимодействия гамма-квантов с люминофором сцинтилляционного детектора (8) последний преобразует энергию гамма-

излучения в световые вспышки – сцинтилляции. При этом суммарная энергия испускаемых фотонов пропорциональна энергии, оставленной гамма-квантом в детекторе. Далее фотоэлектронный умножитель (7) конвертирует световой импульс в импульс электрический. Заряд, собираемый с выхода ФЭУ (7), при прочих равных условиях, пропорционален суммарной энергии сцинтилляций люминофора детектора (8), и, следовательно, энергии, оставленной гамма-квантом в детекторе. В традиционных схемах включения ФЭУ являются источниками тока, на выход которых подключены преобразователи «ток-напряжение». В силу конечного значения времени высвечивания сцинтиллятора и пролета электронов между электродами ФЭУ, наличия паразитных емкостей в конструкции ФЭУ и входных каскадов усилителей, импульс напряжения, получаемый с системы «детектор+ФЭУ+усилитель» может быть описан некоторой функцией (в первом приближении гауссоидой). Амплитуда этого импульса, при сохранении неизменности вышеперечисленных параметров, будет пропорциональна энергии зарегистрированного гамма-кванта.

Токовый импульс с анода ФЭУ (7) поступает на вход преобразователя «ток-напряжение», с выхода импульс напряжения подается на соответствующие входы аналого-цифрового преобразователя. В результате преобразования на выходе блока преобразования «аналог-код» (6) появляется цифровой код, пропорциональный энергии, оставленной гамма-квантом в сцинтилляционном детекторе.

С выхода блока преобразования «аналог-код» (6) данные поступают на вход блока накопления амплитудно-временных спектров (5). Режим работы блока накопления спектров (6) определяется процессором блока памяти.

Таким образом, в приборе происходит накопление амплитудных спектров. Причем весь спектр занимает 256 ячеек памяти – 128 для «мягкой» области (каждый из первых 128 каналов 1024 канального спектра) и 128 для «жесткой» области. Каждый из 128 каналов спектра «жесткой» области содержит 8 каналов первичного 1024-канального спектра.

Передача накопленных спектров осуществляется по командам с блока центрального процессора (3), поступающим по линии последовательного интерфейса в блок накопления спектров (5). Связь скважинного прибора с бортовым компьютером поддерживает блок центрального процессора (3), выполненный традиционным образом, который по команде от наземного измерительного комплекса осуществляет выдачу в линию связи следующих информационных сигналов:

- количество зарегистрированных импульсов в каждом из 128 каналов мягкой части спектра СГК (128 слов),
- количество зарегистрированных импульсов в каждом из 128 каналов жесткой части спектра СГК (128 слов),
- температуру в блоке электроники скважинного модуля (два слова),

- температуру в блоке детектирования скважинного модуля либо показания одноосного акселерометра (одно слово),
- технологические параметры канала СГК (4 слова).

По отдельному запросу дополнительно выдается “электронный” номер прибора, дата прошивки программного обеспечения и его версия.

2.5 Характеристика программного обеспечения аппаратуры

В соответствии с п. 2.1 в состав аппаратуры СГК-1024 входит набор программных средств, поддерживающий всю технологическую цепочку эксплуатации аппаратуры от ее первичной настройки при ремонте и изготовлении до получения исправленных за влияние скважинных условий измерений геофизических параметров - массовых содержаний тория $S_{Ть}$, урана S_U и калия S_K в породе. Характеристика программных средств первичной обработки данных СГК-1024 приведена в разделе 6. Программные средства настройки, тестирования, калибровки и регистрации данных аппаратуры СГК-1024 привязаны к регистрирующему оборудованию. Комплектность и тип поставляемого программного продукта настройки, тестирования и др. определяются заказчиком.

Программное обеспечение настройки аппаратуры СГК-1024Т используется при выполнении ремонтных работ на базе и предназначено для проведения

- настройки спектрометрического тракта аппаратуры;
- настройки приема сигналов и параметров опроса прибора;
- цифрового и графического просмотра принимаемой информации;
- настройки и записи технологических параметров канала СГК;
- чтения и просмотра “электронного” номера прибора, версии программного продукта и даты его прошивки в прибор;
- записи регистрируемой информации в файл (например, при испытаниях аппаратуры на термостабильность).

Программное обеспечение тестирования, полевой калибровки и регистрации данных аппаратуры СГК-1024 предназначено для операторского состава и эксплуатируется при проведении каротажных работ, обеспечивая

- настройку приема сигналов и параметров опроса прибора;
- цифровой и графический просмотр принимаемой информации;
- чтение и просмотр “электронного” номера прибора, версии программного продукта и даты его прошивки в прибор;
- проведение полевой калибровки аппаратуры с целью установления ее работоспособности и выставления энергетической шкалы; результат полевой калибровки документируется в файл и доступен для анализа при обработке и контроле качества выполненного каротажа;

- проведение каротажа с автоматической корректировкой энергетической шкалы аппаратуры и расчетом геофизических параметров в реальном масштабе времен.

Программное обеспечение базовой калибровки аппаратуры СГК-1024 предназначено для метрологических служб предприятия.

Подробное описание этих программных продуктов поставляется вместе с технической документацией на аппаратуру в соответствии с условиями ее эксплуатации (с используемыми регистрирующими средствами).

3 МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ АППАРАТУРЫ

Калибровка аппаратуры СГК-1024Т осуществляется аккредитованными метрологическими службами геофизического предприятия в соответствии с прилагаемой к комплекту аппаратуры инструкцией, в которой регламентированы условия, средства и операции калибровки, описана методика определения метрологических параметров аппаратуры [5].

Калибровка осуществляется при вводе аппаратуры в эксплуатацию и периодически один раз в квартал в процессе эксплуатации, а также после смены детектора гамма-излучения или ремонта механических узлов зондового устройства аппаратуры. Данные калибровки являются основанием для оценки качества и проведения количественной интерпретации результатов каротажа.

Сопроводительная документация на аппаратуру СГК-1024Т должна содержать сведения о первичной калибровке.

3.1 Базовая калибровка аппаратуры

Базовая калибровка аппаратуры выполняется с целью:

- контроля параметров аппаратуры;
- выставления энергетической шкалы;
- определения метрологических характеристик аппаратуры;
- проверки диапазона измерений и определения относительной основной погрешности, вносимой аппаратурой при измерении массовых содержаний тория, урана и калия;
- записи калибровочных данных в файл базовой калибровки для использования на этапах полевой калибровки, регистрации и обработки результатов измерений.

Базовая калибровка аппаратуры СГК-1024Т выполняется на ГСО-ЕРЭ либо аттестованных калибровочных устройствах (УК-СГК) [6], обеспечивающих подобие регистрируемых в них спектров спектрам, регистрируемым в скважинных условиях. Калибровка выполняется в соответствии с инструкцией по калибровке, а также документацией на программу базовой калибровки аппаратуры.

В качестве образцовых средств массовых содержаний тория C_{Th} , урана C_U и калия C_K в установке УК-СГК используются пять калибровочных емкостей специальной конструкции. Значения воспроизводимых ими массовых содержаний тория, урана и калия должны обеспечивать получение калибровочных спектров, пригодных для использования в программах обработки, а также проверку диапазона измерений и определения систематической (ΔC_{Th} , ΔC_U , ΔC_K либо δC_{Th} , δC_U , δC_K) и среднеквадратической случайной ($\delta_c C_{Th}$, $\delta_c C_U$, $\delta_c C_K$) погрешностей:

$$\delta C_{Th} = \frac{1}{C_{Th\text{пасп}}} |C_{Th\text{пасп}} - \bar{C}_{Th}| \times 100 \%,$$

$$\delta C_U = \frac{1}{C_{U\text{пасп}}} |C_{U\text{пасп}} - \bar{C}_U| \times 100 \%,$$

$$\delta C_K = \frac{1}{C_{K\text{пасп}}} |C_{K\text{пасп}} - \bar{C}_K| \times 100 \%.$$

$$\delta_c C_{Th} = \frac{1}{C_{Th}} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K_0} (C_{Th}^k - \bar{C}_{Th})^2}{K_0 - 1}} \times 100 \%,$$

$$\delta_c C_U = \frac{1}{C_U} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K_0} (C_U^k - \bar{C}_U)^2}{K_0 - 1}} \times 100 \%,$$

$$\delta_c C_K = \frac{1}{C_K} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K_0} (C_K^k - \bar{C}_K)^2}{K_0 - 1}} \times 100 \%,$$

где \bar{C}_{Th} , \bar{C}_U и \bar{C}_K средние значения параметров C_{Th} , C_U и C_K равные,

соответственно, $\bar{C}_{Th} = \frac{1}{K_0} \sum_{k=1}^{K_0} C_{Th}^k$, $\bar{C}_U = \frac{1}{K_0} \sum_{k=1}^{K_0} C_U^k$, и $\bar{C}_K = \frac{1}{K_0} \sum_{k=1}^{K_0} C_K^k$,

K_0 – число отсчетов, $C_{Th\text{пасп}}$, $C_{U\text{пасп}}$ и $C_{K\text{пасп}}$ - паспортные значения массовых концентраций тория, урана и калия в калибровочном устройстве.

В табл. 6 приведены требования к метрологическим характеристикам аппаратуры СГК-1024.

Результат базовой калибровки записывается в файл базовой калибровки с указанием даты ее проведения и параметров использованного оборудования (номера прибора, типа и номера калибровочной установки и др.).

Кроме того, создается протокол базовой калибровки прибора, рекомендуемая форма которого приведена в Приложении 1.

Таблица 6 - метрологические характеристики аппаратурно-измерительного комплекса SGK-1024T (SGK-1024T-200) и требования к их значениям

Наименование характеристик	Требования к характеристикам
1. Систематическая составляющая погрешности измерений: ΔC_{Th} , ppm (при $C_{Th} \geq 20$ ppm, % отн.) ΔC_U , ppm (при $C_U \geq 20$ ppm, % отн.) ΔC_K , % абс (при $C_K \geq 5\%$, % отн.)	не более 2 (не более 10) не более 2 (не более 10) не более 0.3 (не более 10)
2. Среднеквадратическая случайная составляющая погрешности измерений $\delta_{C_{Th}}$, % отн. при $C_{Th} \geq 20$ ppm $\Delta_{C_{Th}}$, ppm при $C_{Th} < 20$ ppm δ_{C_U} , % отн. при $C_U \geq 20$ ppm Δ_{C_U} , ppm при $C_U < 20$ ppm δ_{C_K} , % отн. при $C_K \geq 5,0$ % Δ_{C_K} , % абс. при $C_K < 5,0$ %	не более 5 не более 1.0 не более 5 не более 1.0 не более 5 не более 0.25

Примечание: Систематическая составляющая погрешности измерений определяется отклонением от паспортных значений массовых содержаний тория, урана и калия, полученных по результатам измерений в ПКУ-ЕРЭсмесь и ПКУ-ЕРЭфон.

Для расчета погрешностей определения массовых содержаний ЕРЭ на нижней границе диапазона измерений используются результаты измерений в ПКУ-ЕРЭфон.

Для расчета погрешностей определения массовых содержаний ЕРЭ на середине диапазона измерений используются результаты измерений в ПКУ-ЕРЭсмесь.

3.2 Полевая калибровка аппаратуры

Полевая калибровка аппаратуры выполняется перед проведением каротажа в скважине в интервале с повышенной гамма-активностью породы с целью:

- установления ее работоспособности;
- контроля (либо выставления) энергетической шкалы аппаратуры в соответствии с энергетической шкалой при базовой калибровке;
- регистрации опорного спектра для последующего использования его при автоматической привязке энергетической шкалы спектрометра в процессе каротажа.

Полевая калибровка аппаратуры SGK-1024 является обязательным этапом при выполнении каротажа. Полевая калибровка выполняется в соответствии с инструкцией на аппаратуру, а также документацией на программу полевой калибровки аппаратуры.

Данные полевой калибровки должны быть доступны при обработке материалов каротажа.

4 МЕТОДИКА СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1 Регистрируемые параметры

Аппаратура SGK-1024 обеспечивает регистрацию следующих параметров:

- поток гамма-излучения естественной активности пород на детекторе канала SGK (скоростей счета в энергетических окнах);
- температура внутри прибора;
- показания одноосного акселерометра;
- технологические параметры канала SGK.

Расчетными параметрами являются естественная гамма-активность пород в единицах МЭД либо ЭМДУ и массовые содержания тория, урана и калия в породе.

4.2 Дискретность данных по глубине, скорость каротажа

Дискретность записи данных по глубине и скорость каротажа определяются мощностью пласта h_{\min} , подлежащего количественной обработке [5].

Дискретность регистрации данных по глубине должна обеспечивать не менее 5 точек на пласт, подлежащий количественной обработке.

Скорость каротажа должна обеспечивать величину случайной погрешности, приведенной к пласту регламентированной мощности, не более 6% при общих ($h_{\min}=3\div 4$ м) исследованиях и не более 5% при детальном ($h_{\min}=1\div 2$ м) исследовании по каналу интегрального ГК и не более величины основной относительной погрешности по каналам тория, урана и калия. Для выполнения этих требований скорость каротажа при общих исследованиях не должна превышать 140÷180 м/ч в активном (терригенном) разрезе ($J_{\text{ГК}} > 4\div 5 \text{ мкР/ч}$) и 110÷150 м/ч в низкоактивном (карбонатном) разрезе ($J_{\text{ГК}} < 4\div 5 \text{ мкР/ч}$). При детальном исследовании скорость не должна превышать, соответственно, 80÷120 м/ч и 60÷100 м/ч.

Повышение детальности исследований достигается уменьшением шага дискретизации по глубине при одновременном пропорциональном снижении скорости каротажа. Рекомендуемые значения выбираются из ряда 5, 10, 20 см.

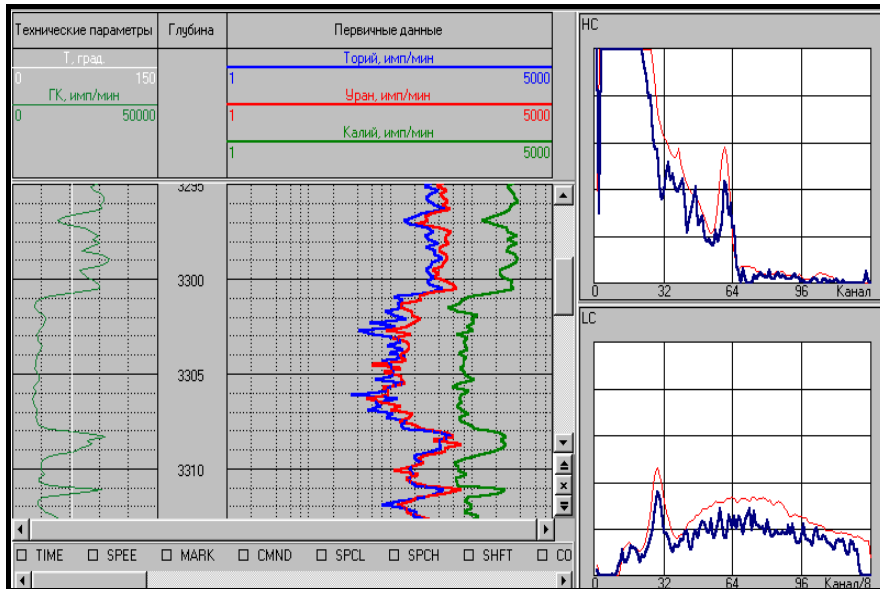
4.3 Порядок работы на скважине

Измерения на скважине проводятся в соответствии с [5] и технологической схемой, обеспечиваемой используемым регистратором, при выполнении следующих операций:

- развертывание аппаратуры, ее включение, настройка и проверка работоспособности;
- прогрев аппаратуры в течение $10 \div 15$ минут (эта операция обычно совмещается со спуском в скважину);
- спуск прибора в скважину в интервал с повышенной активностью; скорость спуска не должна превышать 5000 м/час;
- проведение полевой калибровки канала СГК; при работе в связке с аппаратурой нейтронного каротажа следует учитывать возможность активации породы и элементов конструкции скважины нейтронами, а потому полевая калибровка должна в этом случае выполняться вне интервала записи;
- доставка прибора в интервал каротажа;
- проведение каротажа с повторением интервала (не менее 50 м) с наибольшей дифференциацией либо интервала, представляющего наибольший интерес; скорость записи при проведении повторного замера должна соответствовать скорости записи основного замера;
- редактирование записи (при выявлении брака записи исследования выполняются повторно);
- выключение прибора, подъем и извлечение прибора из скважины; подъем прибора вне интервала исследования ведется со скоростью не более 5000 м/час;
- свертывание аппаратуры.

При спуске прибора в скважину и проведении каротажа обязательному контролю (дополнительно к [5]) подлежат стабильность приема данных (количество сбоев по приему данных не должно превышать 1 на 10 метров записи) и параметров питания аппаратуры. При проведении каротажа дополнительно следует визуально контролировать качество стабилизации энергетической шкалы – характерные пики текущего регистрируемого спектра и спектра полевой калибровки не должны расходиться более чем на $4 \div 6$ каналов (см. рис. 4).

а)



б)

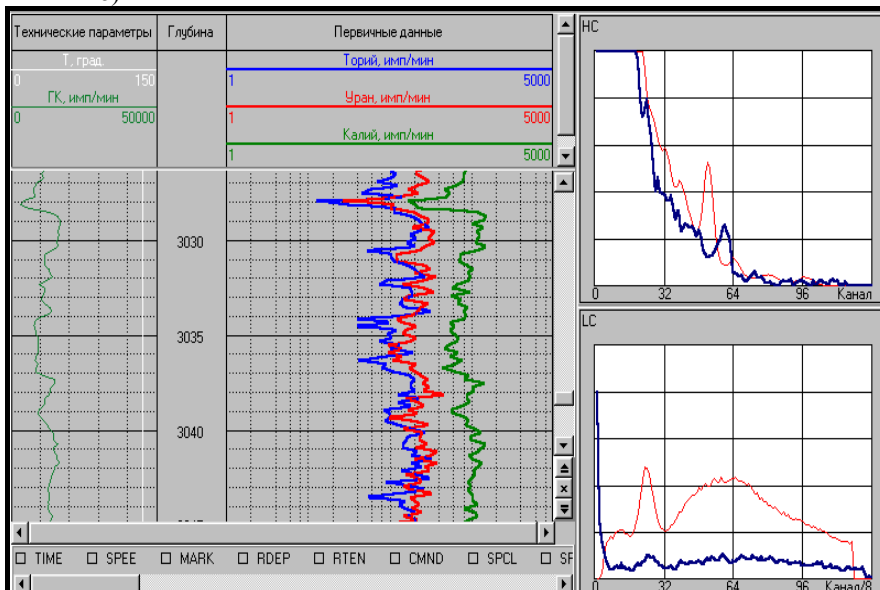


Рис. 4. Аппаратура SGK-1024Т – визуализация режима измерений:
 а) – пример правильной настройки энергетической шкалы спектрометра;
 б) – пример неправильной настройки энергетической шкалы спектрометра.
 4.4 Оформление и контроль качества измерений

Редактирование результатов каротажа является обязательным этапом, выполняемым оператором на скважине после завершения измерений данным (очередным) прибором. Этап редактирования обеспечивает увязку данных по магнитным меткам и точкам записи, а также подготовку файла для проведения контроля качества каротажа. Основные положения контроля качества измерений регламентируются технической инструкцией [5], в соответствии с которой качество характеризуется тремя оценками – “хорошо”, “удовлетворительно”, “брак”. Бракованные материалы к обработке не допускаются.

Кроме общих положений инструкции [5] дополнительно контролируются следующие параметры. В интервале перекрытия проводится расчет относительных систематической δ и полной случайной $\delta_{\text{сл}}$ погрешностей, приведенных к пласту регламентированной толщины $H = \sum_{i=1}^n h_i$:

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times h_i)}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad \Delta_i = C_i - C_{i,\text{повт}}, \quad C = (C_K, C_{Th}, C_U),$$

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i \times h_i)}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad \delta = 100 \times \bar{\Delta} / \bar{C},$$

$$\delta_{\text{сл}} = 100 \times \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2 \right) \times h_i} / \left(2 \times \bar{C}^2 \times \sum_{i=1}^n h_i \right),$$

Рекомендуется рассчитываемые значения δ и $\delta_{\text{сл}}$ приводить к пласту толщиной $H=2, 5$ или 10 м. При этом должны выполняться следующие требования. Расхождение между массовыми содержаниями, определенными по основному и повторному замерам (систематические погрешности $\bar{\Delta}$), для урана и тория по интервалам не менее 5 м не должно превышать ± 2 ppm для общих и $\pm 1,5$ ppm для детальных исследований. Соответствующая погрешность определения калия не должна превышать $0,3$ % для общих исследований и $0,2$ % для детальных. Полные случайные погрешности определения урана и тория в тех же условиях не должны превышать $\pm 2,5$ ppm и $\pm 1,5$ ppm, соответственно [5, 7], а калия – $\pm 0,2$ %.

В интервале контрольных измерений СГК толщины и конфигурации пластов должны соответствовать значениям ранее выполненных исследований.

Общие требования к составу и форматам передаваемой заказчику документации определяются [5], дополнительные – соответствующими соглашениями заказчика и исполнителя работ.

Рекомендуемые форматы вывода калибровочных данных и результатов каротажа на твердых копиях для аппаратуры СГК-1024 приведены в табл. 1, 2 Приложения 2 и на рис. 5.

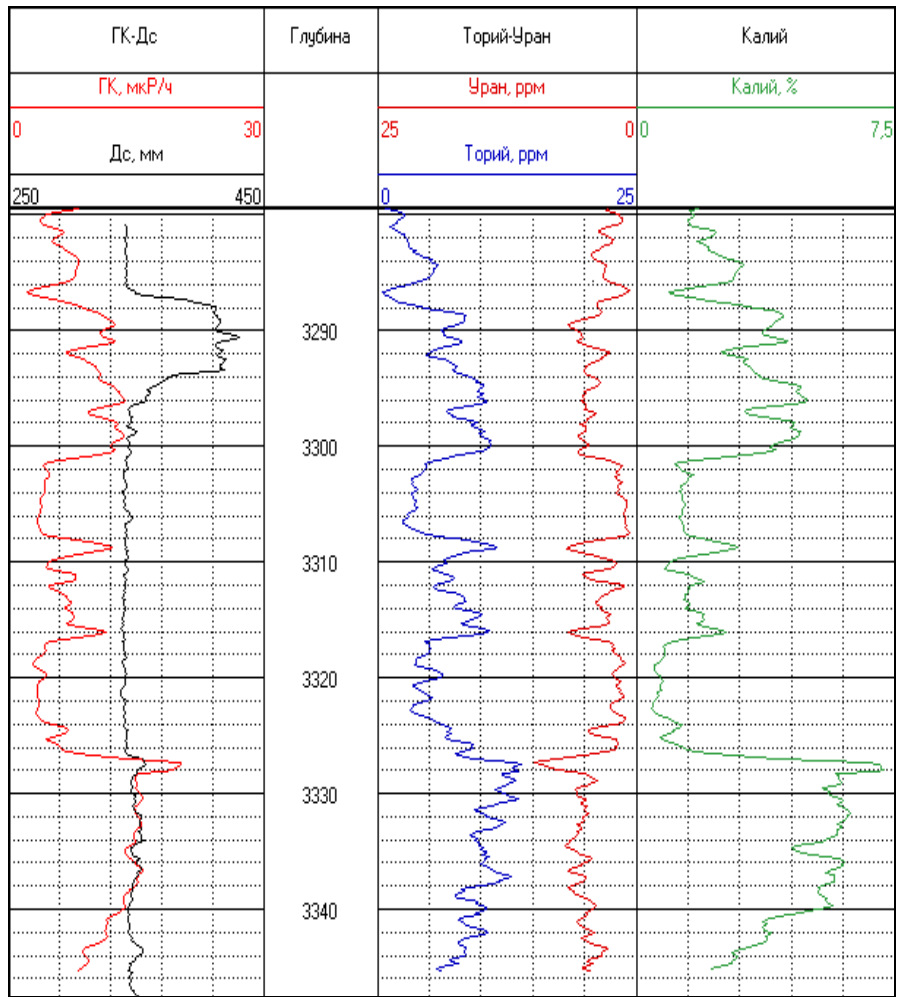


Рис. 5. Рекомендуемый формат вывода результатов каротажа на твердую копию для аппаратуры СГК-1024

5 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Первичная обработка SGK состоит в расчете массовых концентраций тория, урана и калия в породе, а также кривой интегральной гамма-активности, исправленных за влияние технических условий каротажа, то есть приведенных к стандартным условиям измерений. Стандартные условия определяются следующими параметрами – пласт известняка плотностью $2,71 \text{ г/см}^3$ пересечен скважиной диаметром 200 мм, плотность ПЖ равна $1,20 \text{ г/см}^3$, раствор неактивен, глинистая корка отсутствует, прибор прижат к стенке скважины.

5.1 Определение границ пластов и снятие отсчетов с кривой SGK

Форма кривых SGK (интегрального ГК, массовых содержаний тория, урана и калия) против пластов конечной мощности и повышенной гамма-активности для прижатого к стенке скважины прибора слабо зависит от технических условий измерений и определяется плотностью пласта и в меньшей степени составом излучения. Границы пласта определяются положением точек со значением $1/2$ амплитуды аномалии при произвольной его толщине. В пластах ограниченной мощности амплитуда аномалии занижена на величину $\beta = \Delta J_{\text{ГК, max}} / \Delta J_{\text{ГК, } \infty}$ где $\Delta J_{\text{ГК, max}}$ – зарегистрированная амплитуда аномалии, $\Delta J_{\text{ГК, } \infty}$ – величина аномалии для пласта той же активности, но бесконечной толщины. Здесь в качестве величины ΔJ могут выступать величины ΔC_{Th} , ΔC_{U} , ΔC_{K} . Зависимость β от мощности пласта приведена на рис. 6.

5.2 Расчет массовых содержаний тория, урана и калия

Определение массовых содержаний естественных радиоактивных элементов C_{Th} , C_{U} и C_{K} в аппаратуре SGK-1024 производится путем разложения зарегистрированных в скважине спектров на калибровочные (стандартные), зарегистрированные в стандартных образцах массовых содержаний ЕРЭ. Поэтому первым этапом обработки результатов каротажа аппаратурой SGK-1024 является контроль и, в случае необходимости, доувязка энергетических шкал текущих спектров с энергетической шкалой калибровочных спектров. Это выполняется путем нахождения коэффициентов преобразования a и b энергетической шкалы (либо номера канала n), которые определяются по методу наименьших квадратов через минимизацию функции

$$\sum_{n=1}^N (\bar{J}_s(n) - \bar{J}(a \times n + b))^2 = \min_{a,b}$$

где $\vec{J} = (J_1, J_2, \dots, J_n)$ – текущий аппаратный спектр, а J_1, J_2, \dots – число импульсов в каналах $1, 2, \dots, N$, приведенные к единице времени, \vec{J}_S – аппаратный спектр в калибровочной модели.

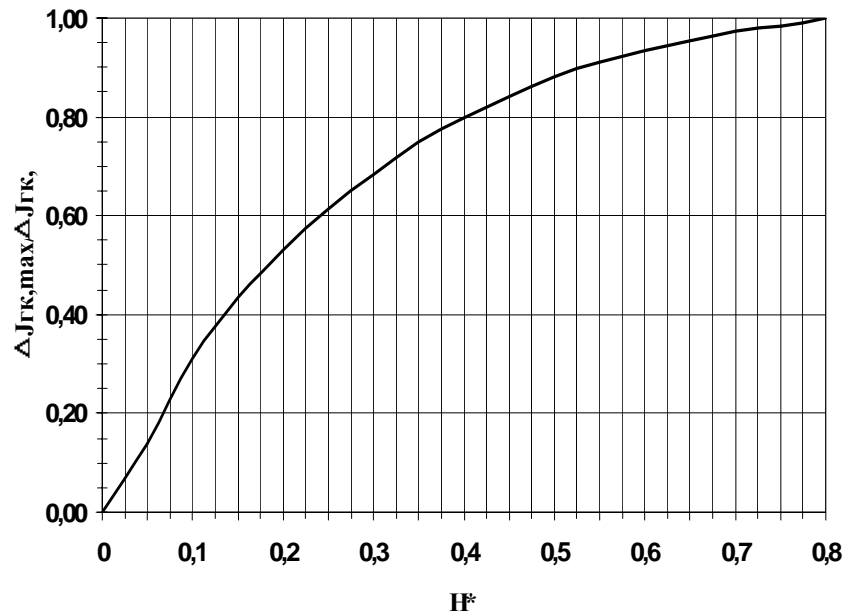


Рис. 6. Поправочный множитель на влияние конечной мощности пласта на величину аномалии $\Delta J_{ГК}$.

Определение собственно массовых содержаний естественных радиоактивных элементов является следующим этапом и производится путем решения уравнения

$$A\vec{C} = \vec{J} + \vec{E} \quad (1)$$

где A – калибровочная матрица, $\vec{C} = (C_{Th}, C_U, C_K)$ – определяемые содержания (массовые доли) тория, урана и калия. Так как величины \vec{J} распределены по закону Пуассона, то дисперсия случайной ошибки \vec{E} равна \vec{J} .

Матрица A находится при калибровке спектрометра и может быть определена как

$$AC = J + E \text{ или } C^t A^t = J^t + E^t$$

где \mathbf{E} – матрица ошибок результатов измерений, \mathbf{C} – матрица массовых содержаний тория, урана и калия в калибровочных моделях, а символ t означает транспонирование. Поскольку при калибровке измерения могут проводиться достаточно долго, то случайными ошибками измерений скорости счета можно пренебречь. Тогда в соответствии с методом наименьших квадратов, умножая обе части последнего равенства на \mathbf{C} , получим

$$\mathbf{C}\mathbf{C}^t\mathbf{A}^t=\mathbf{C}\mathbf{J}^t, \mathbf{A}^t=(\mathbf{C}\mathbf{C}^t)^{-1}\mathbf{C}\mathbf{J}^t \text{ или } \mathbf{A}=\mathbf{J}\mathbf{C}^t(\mathbf{C}\mathbf{C}^t)^{-1}. \quad (2)$$

Если условия измерений в скважине совпадают с условиями калибровки, а процесс измерений стационарный, то для определения по результатам каротажа массовых содержаний тория, урана и калия в пласте решается система уравнений:

$$\mathbf{A}\vec{\mathbf{C}} = \vec{\mathbf{J}} - \vec{\mathbf{J}}_0 + \vec{\mathbf{E}}, \quad (3)$$

где $\vec{\mathbf{J}}_0 = (J_{10}, J_{20}, \dots, J_{n0})$ - показания каналов спектрометра, обусловленные фоном (например, излучением промывочной жидкости). Если показания в каналах взаимонезависимы (т.е. энергетические интервалы каналов взаимно не пересекаются, а разрешение при каротаже не меняется), то ковариационная матрица ошибок будет диагональной.

Решение системы уравнений (3) обычным методом наименьших квадратов по теореме Гаусса-Маркова

$$\vec{\mathbf{C}} = (\mathbf{A}^t\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^t(\mathbf{J} - \mathbf{J}_0)$$

эффективно лишь в том случае, когда ковариационная матрица ошибок может быть представлена в виде $\mathbf{V} = \sigma^2\mathbf{I}$, где \mathbf{I} - единичная матрица, σ^2 - дисперсия измерений. Умножая уравнение (3) на $\mathbf{V}^{1/2}$ мы приведем его к виду, когда выполняются условия эффективности оценок.

На практике нам известна не сама ковариационная матрица, а ее оценка $\vec{\mathbf{J}}$. Результаты расчетов содержаний по формуле (3) сильно зависят от значений ковариационной матрицы ошибок. Использование $\vec{\mathbf{J}}$ практически не дает многоканальной спектрометрии никаких преимуществ, а в ряде случаев может даже значительно увеличить дисперсию содержаний ЕРЭ. Учитывая это, в качестве величины ковариационной матрицы ошибок принимается результат итерационного процесса, на каждом шаге которого по определенным значениям содержаний вновь вычисляется матрица ошибок. При этом дополнительно используется регуляризирующее условие положительности определяемых содержаний. Так как это условие используется только на этапе вычисления ковариационной матрицы, то оно не приводит к смещению результатов.

5.3 Учет влияния условий измерений в скважине на результаты СГК

Интерпретационное обеспечение первичной обработки СГК-1024 при расчете массовых содержаний тория, урана и калия в пласте позволяет учитывать влияния скважинных условий измерений в обсаженных и необсаженных скважинах, а именно: плотности и активности промывочной жидкости, глинистой корки, диаметра скважины, обсадной колонны и ее толщины, плотности и активности цемента.

Учет активности промывочной жидкости выполняется с использованием методики минимальных либо максимальных показаний. При использовании методики минимальных показаний значение \bar{J}_0 (см. (3)) принимается равным минимальному значению \bar{J} и корректируется только на диаметр скважины. При использовании методики максимальных показаний значение \bar{J}_0 определяется по отношению радиоактивности глинопорошка (по данным лабораторных исследований) и глин, надежно выделяющихся в разрезе.

В общем случае учет технических условий каротажа проводится путем корректировки (трансформации) калибровочной матрицы **A** к условиям регистрации текущего обрабатываемого спектра. Эта корректировка проводится на основании данных, полученных экспериментальным (на моделях пластов) и расчетным путем (методом Монте-Карло).

В табл. 7 приведены (в качестве примера) поправки за влияние диаметра скважины и плотности ПЖ на результаты определения массовых содержаний тория, урана и калия.

В обсаженных скважинах вводится поправка за активность цемента аналогично поправке за активность ПЖ в открытом стволе с учетом диаметра скважины, а также поправка за ослабление излучения обсадной колонной.

Влиянием эффективного атомного номера горных породы на показания аппаратуры СГК-1024 пренебрегают, т.к. в обработке участвует не весь спектр, а лишь его часть в диапазоне энергий 200-3000 КэВ.

Пример обработки данных СГК-1024Т приведен на рис. 7 совместно с результатом контрольного перекрытия.

5.4 Технология проведения первичной обработки спектрометрического гамма-каротажа

Проведение первичной обработки данных СГК-1024 состоит в выполнении следующих этапов:

- выбор Lis-файла с данными каротажа аппаратуры СГК-1024, подлежащих первичной обработке;
- ввод технических параметров условий проведения каротажа (диаметра скважины, плотности ПЖ и др.);

Таблица 7 - поправочный коэффициент на влияние диаметра скважины и плотности промывочной жидкости при измерении массовых содержаний тория, урана и калия аппаратурой СГК-1024

Элемент	Плотность ПЖ, г/см ³	Диаметр скважины, мм							
		115	150	200	250	300	350	400	450
Торий	1.00	1.18	1.09	1.00	0.93	0.87	0.82	0.78	0.74
Уран		1.21	1.11	1.00	0.92	0.85	0.80	0.76	0.70
Калий		1.22	1.11	1.00	0.91	0.83	0.76	0.72	0.68
Торий	1.20	1.17	1.07	0.97	0.89	0.83	0.78	0.74	0.70
Уран		1.21	1.09	0.97	0.88	0.82	0.76	0.72	0.68
Калий		1.22	1.09	0.97	0.87	0.79	0.72	0.67	0.63
Торий	1.40	1.18	1.06	0.94	0.86	0.79	0.74	0.70	0.66
Уран		1.21	1.07	0.94	0.85	0.78	0.72	0.68	0.64
Калий		1.21	1.07	0.94	0.83	0.75	0.68	0.63	0.60
Торий	1.40/барит	1.21	1.05	0.95	0.86	0.79	0.74	0.70	0.66
Уран		1.23	1.06	0.95	0.85	0.78	0.71	0.67	0.64
Калий		1.19	1.06	0.94	0.84	0.74	0.68	0.63	0.60
Торий	1.60/барит	1.23	1.01	0.91	0.82	0.75	0.70	0.66	0.63
Уран		1.26	1.01	0.90	0.80	0.74	0.68	0.65	0.62
Калий		1.20	1.02	0.90	0.79	0.70	0.64	0.60	0.57
Торий	1.80/барит	1.25	0.97	0.87	0.78	0.72	0.67	0.63	0.60
Уран		1.27	0.97	0.86	0.77	0.70	0.65	0.62	0.59
Калий		1.21	0.99	0.86	0.75	0.66	0.61	0.57	0.54

Примечание. Активность ПЖ равна нулю.

- (ширина фильтра по глубине не менее 1м) фильтрацию спектров при выполнении ввод/определение условий обработки (учитываемых при обработке параметров условий проведения каротажа);
- импорт дополнительных кривых (кавернометрии, плотности породы и др.), используемых при обработке данных спектрометрического гамма-каротажа (эта операция выполняется при наличии этих данных);
- увязка (проверка соответствия) данных СГК по глубине к ранее выполненному комплексу ГИС;
- выбор (вход в режим просмотра) полевой калибровки и установление факта ее проведения; при отсутствии полевой калибровки дальнейшая работа выполняется с базовой калибровкой, соответствующей (по номеру) использованной при каротаже аппаратуре;

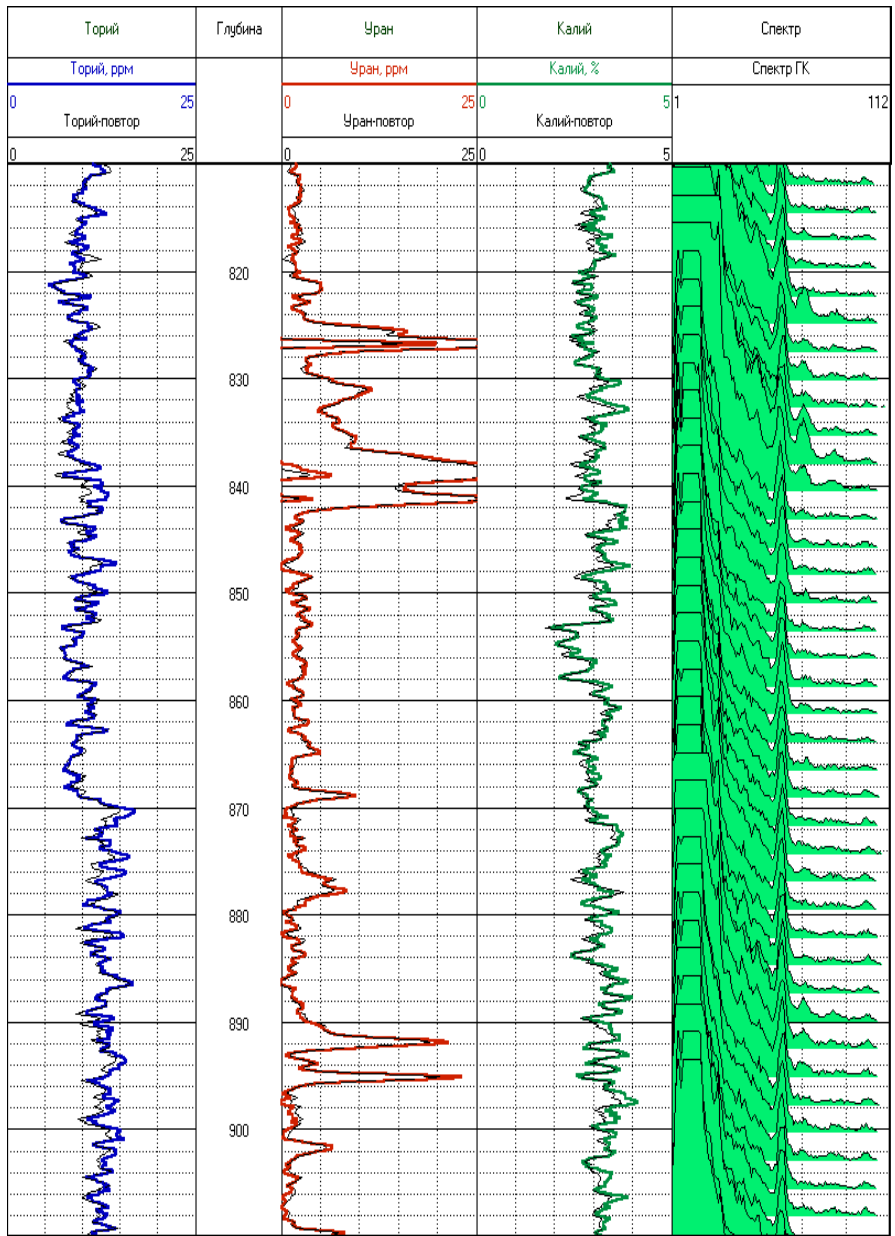


Рис. 7. Пример обработки данных СГК-1024Т совместно с результатом контрольного перекрытия

- при наличии полевой калибровки в выбранном файле устанавливаются качество ее проведения по пику характеристического излучения свинца (расхождение в положениях пиков характеристического излучения свинца при полевой и базовой калибровках не должно превышать $1 \div 2$ каналов) и наличие дополнительного сдвига нуля энергетической шкалы спектрометра при проведении полевой калибровки относительно его энергетической шкалы при проведении базовой калибровки по положениям пиков калия, урана и тория (расхождение в положениях перечисленных пиков при полевой и базовой калибровках не должно превышать $1 \div 2$ каналов); при установлении наличия дополнительного сдвига нуля либо плохого качества полевой калибровки дальнейшая работа выполняется с базовой калибровкой, соответствующей (по номеру) использованной при каротаже аппаратуре;
- устанавливаются параметры привязки энергетической шкалы (тип фильтрации данных и величина дополнительного сдвига нуля энергетической шкалы спектрометра); при обработке данных СГК, зарегистрированных в открытом стволе, рекомендуется использовать “сильную” привязку энергетической шкалы; при обработке данных СГК, зарегистрированных в закрытом стволе, на участках с высокой намагниченностью обсадной колонны привязку энергетической шкалы спектров следует проводить без фильтрации; при отсутствии дополнительного сдвига нуля привязку энергетической шкалы зарегистрированных при каротаже спектров следует выполнять в режиме “по мягкой части”, в противном случае в режиме “по жесткой части” либо в режиме “по мягкой части” с включением флага искусственного ввода сдвига нуля энергетической шкалы;
- проводится привязка энергетической шкалы зарегистрированных при каротаже спектров;
- устанавливается качество привязки энергетической шкалы (кривая **СОЕФ** не должна иметь срывов; интервалы срывов должны быть переобработаны либо с измененными параметрами привязки, либо с другим калибровочным спектром из ряда “торий-уран-калий”);
- в режиме осреднения данных в $4 \div 6$ интервалах по глубине по положениям пиков калия, урана и тория устанавливается соответствие энергетических шкал используемого калибровочного спектра и текущих зарегистрированных (расхождение в положениях перечисленных пиков не должно превышать $1 \div 2$ каналов); при установлении наличия расхождения в положениях пиков проводится переобработка данных с измененными параметрами привязки в соответствии с вышеприведенными критериями;
- устанавливаются параметры обработки данных каротажа; при расчете содержаний урана, тория и калия рекомендуется использовать

“слабую” фильтрацию спектров, при этом тип обработки должен быть “многооконным”; методика обработки выбирается в соответствии с п. 5.3; расчет объемных содержаний тория, урана и калия возможен только при наличии в файле кривой объемной плотности породы;

- выполняется расчет содержаний тория, урана и калия;
- в режиме осреднения данных в 2÷3 интервалах по глубине с существенно различными по результатам обработки содержаниями калия, урана и тория визуально, на качественном уровне, по амплитудам основных линий устанавливается соответствие осредненных спектров рассчитанным содержаниям C_K , C_U и C_{Th} ; эта операция проводится с целью контроля соответствия собственных действий интерпретатора описанному выше регламенту;
- выполнение описанного регламента обработки с файлом контрольного замера;
- вход в режим технического контроля качества и выдача заключения по качеству полученных данных; при выполнении контроля качества убедиться в правильности увязки по глубине кривых THOR, URAN, ROTA и THO*, URA*, ROT*; форма заключения по качеству материала приведена в Приложении 3.

В Приложении 4 приведен список мнемоник регистрируемых и расчетных кривых аппаратуры СГК-1024.

5.5 Информационные возможности спектрометрического гамма-каротажа

Информационные возможности СГК могут быть реализованы на нескольких уровнях. Первый уровень, использующий собственно результаты определения массовых содержаний тория, урана и калия, связан с диагностическими возможностями отношений массовых содержаний C_{Th}/C_U , C_U/C_K и C_{Th}/C_K . В табл. 8 приведена информационная значимость этих отношений [2, 3]. Второй уровень связан с использованием установленных на конкретном объекте корреляционных связей массовых содержаний ЕРЭ с параметрами породы (минеральной глинистостью, содержанием пелитовой фракции, степенью доломитизации и др.) непосредственно для получения значений этих параметров. Третий уровень, наиболее полно использующий информационные возможности метода, состоит во включении полученных по данным СГК геофизических параметров (C_{Th} , C_U , C_K) в общий комплекс обрабатываемых параметров в рамках интерпретационной модели объекта исследования $\vec{V} = (V_1, V_2, \dots, V_N)$:

$$\begin{aligned} C_{Th} &= F_{Th}(\vec{V}), \\ C_U &= F_U(\vec{V}), \\ C_K &= F_K(\vec{V}), \end{aligned} \quad (4)$$

$$K_{п,ннк} = F_{ннк}(\vec{V}),$$

...
...
...

Здесь V_1, V_2, \dots, V_N – объемные компоненты интерпретационной модели ($V_1 + V_2 + \dots + V_N = 100$), $\vec{F} = (F_{Тh}, F_U, F_K, \dots)$ – функции, связывающие значения геофизических параметров породы ($C_{Тh}, C_U, C_K, K_{п, ннк}, \dots$) с объемными компонентами породы (петрофизические связи). Связи $F_{Тh}(\vec{V}), F_U(\vec{V}), F_K(\vec{V})$ можно всегда представить линейными относительно объемных компонент $F(\vec{V}) = (C_1 V_1 + C_2 V_2 + \dots + C_N V_N)$. Решение системы (4) может быть выполнено многими способами. Основным и самым сложным вопросом при этом всегда будет создание интерпретационной модели объекта исследования, а именно: определение размерности модели, минерального и микропримесного состава компонент, их гранулометрических характеристик, уточнение петрофизических связей (в случае необходимости) и некоторые другие вопросы.

Таким образом, привязка (установление либо уточнение связей с интересующими геологическими параметрами исследуемого объекта) получаемых по данным СГК массовых содержаний тория, урана и калия к объекту обработки является обязательным этапом включения их в интерпретационный комплекс методов (геофизических параметров).

Примеры использования СГК для решения некоторых из перечисленных выше задач приведены на рис. 8.

Таблица 8 - характеристика информативности отношения массовых содержаний тория, урана и калия

Отношение	Характеристика информативности
Торий/Уран	<p>В осадочных породах отношение Th/U изменяется в зависимости от условий среды осадкообразования;</p> <p>Th/U > 7 – континентальные условия, окислительная среда, выветренные почвы;</p> <p>Th/U < 7 – морские осадки, серые и зеленые глинистые сланцы, грауваки;</p> <p>Th/U < 2 – морские черные глинистые сланцы, фосфаты.</p> <p>В изверженных породах высокое значение Th/U указывает на существование окислительной среды в период кристаллизации магмы или на ее интенсивное выщелачивание после раскристаллизации.</p> <p>Возможность оценки количества органического углерода в глинистых осадочных породах.</p> <p>Выявление многих типов геологических несогласий.</p> <p>Стратиграфические корреляции, окислительно-восстановительные режимы и др.</p>
Уран/Калий	<p>Возможность оценки количества органического углерода в глинистых осадочных породах.</p> <p>Стратиграфические корреляции.</p> <p>Для терригенных и карбонатных отложений установление связей с кавернами и системами естественных трещин в пласте и др.</p>
Торий/Калий	<p>Условия осадконакопления.</p> <p>Диagenетические изменения глинистых отложений.</p> <p>Определение типа глин: значение отношения Th/K увеличивается в ряду глауконит-мусковит-иллит-смешанослойные глинистые минералы-каолинит-хлорит-боксит.</p> <p>Выделение типов пород в различных фациях и др.</p>

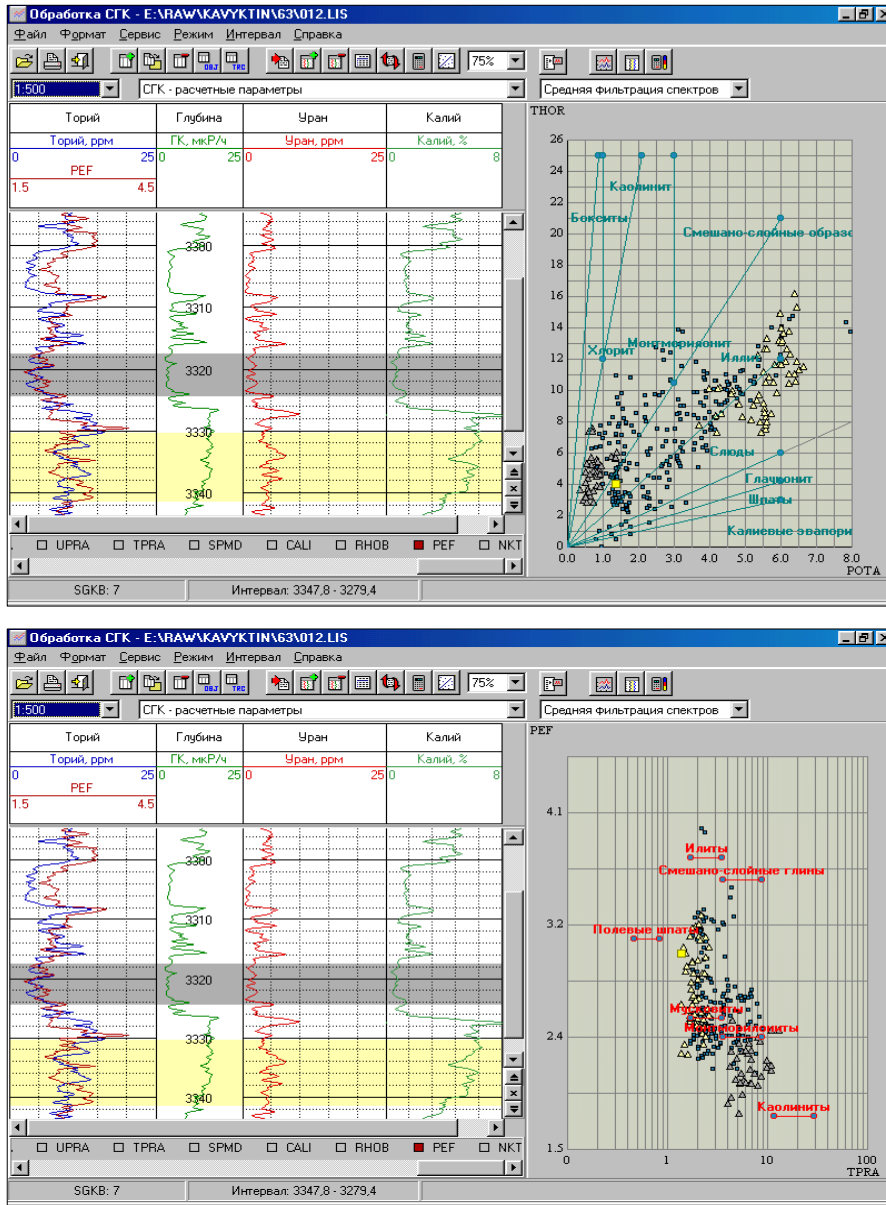


Рис 8. Пример использования SGK для определения типа глинистого материала

6 ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ

Программное обеспечение первичной обработки данных каротажа аппаратурой СГК-1024 выполнено в операционных средах DOS и WINDOWS. Результатом обработки являются исправленные за влияние скважинных условий измерений массовые содержания урана, тория и калия. Получение перечисленных выше геофизических параметров выполняется как для необсаженных, так и для обсаженных скважин. Формат первичных данных – LIS.

Программы обработки данных СГК имеют единый графический интерфейс и обеспечивают выполнение следующих операций:

- графический и цифровой просмотр данных каротажа, расчетных и сопровождающих кривых (рис. 9);
- просмотр либо выбор из файла базовой калибровки данных калибровок аппаратуры СГК-1024Т (рис. 11);
- первичную обработку данных каротажа (рис. 12);
- контроль качества каротажа по повторному замеру;
- документирование результатов, параметров и условий обработки в файле (рис.12).

Дополнительно программы первичной обработки предоставляют следующие сервисные функции:

- фильтрацию кривых, устранение единичных сбоев, линейные преобразования с кривыми;
- импортирование данных из других LIS и LAS файлов;
- ввод и корректировку форматов визуализации данных;
- увязку кривых по глубине;
- конвертирование результатов обработки LIS⇒LAS.

Подробное описание этого программного продукта поставляется вместе с аппаратурой СГК-1024Т.

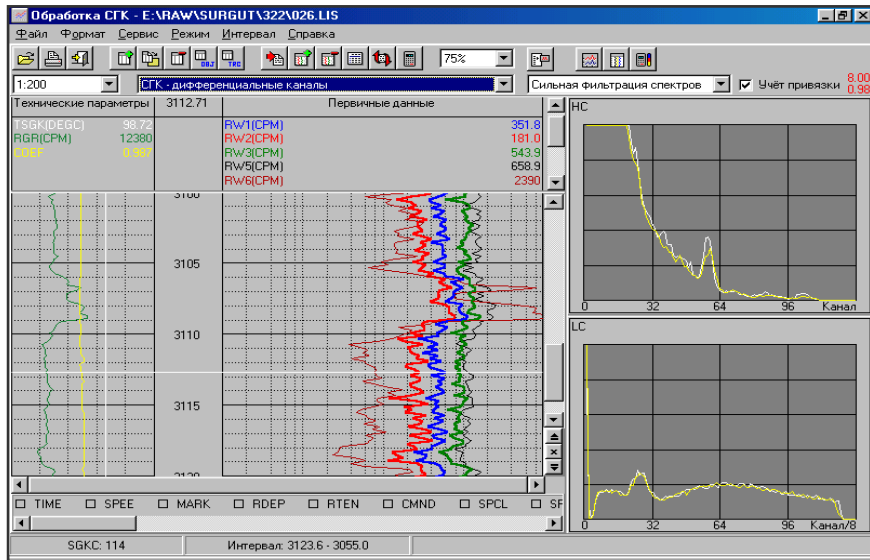
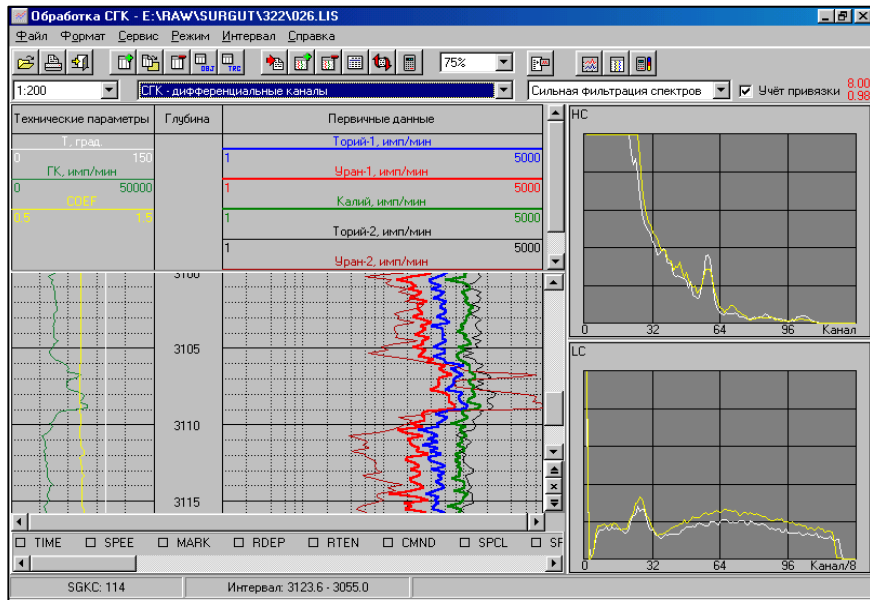


Рис.9. Графический и цифровой просмотр данных каротажа

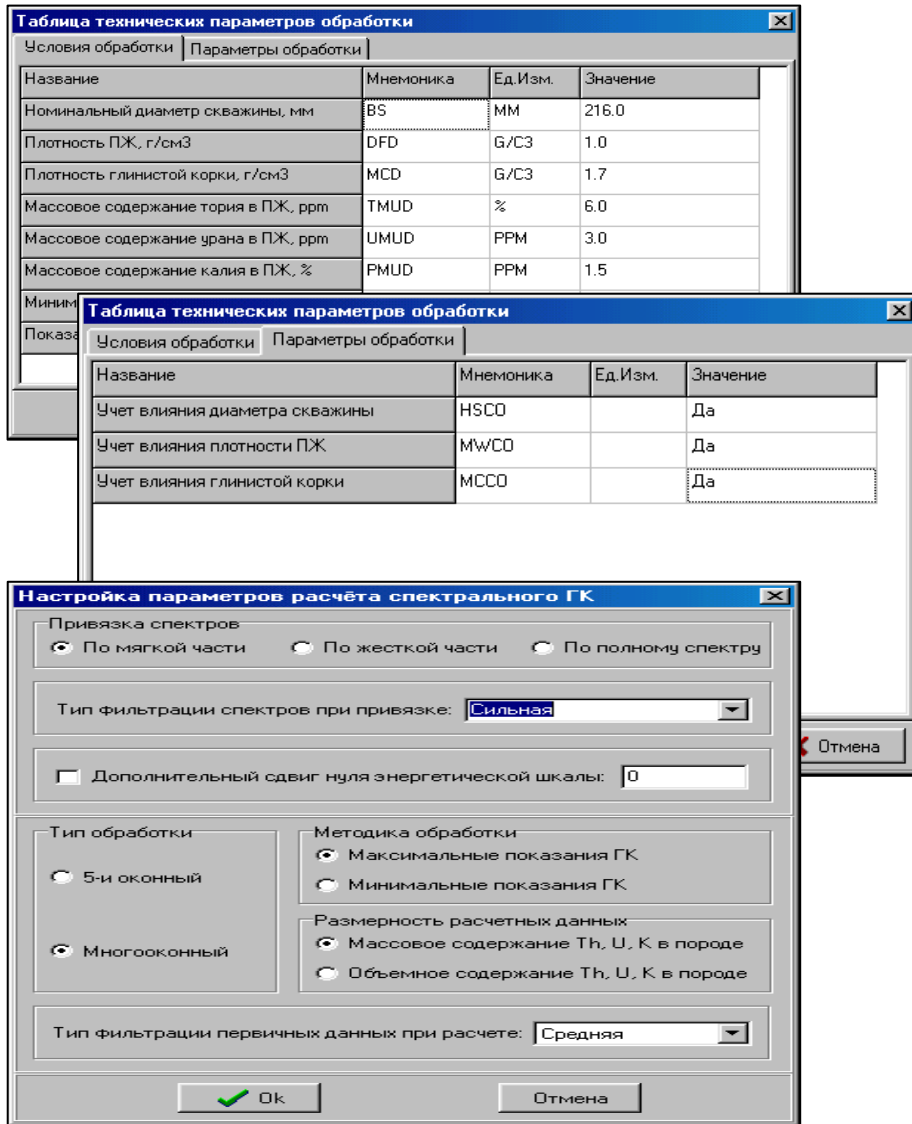


Рис. 10. Просмотр и корректировка условий и параметров обработки данных СГК

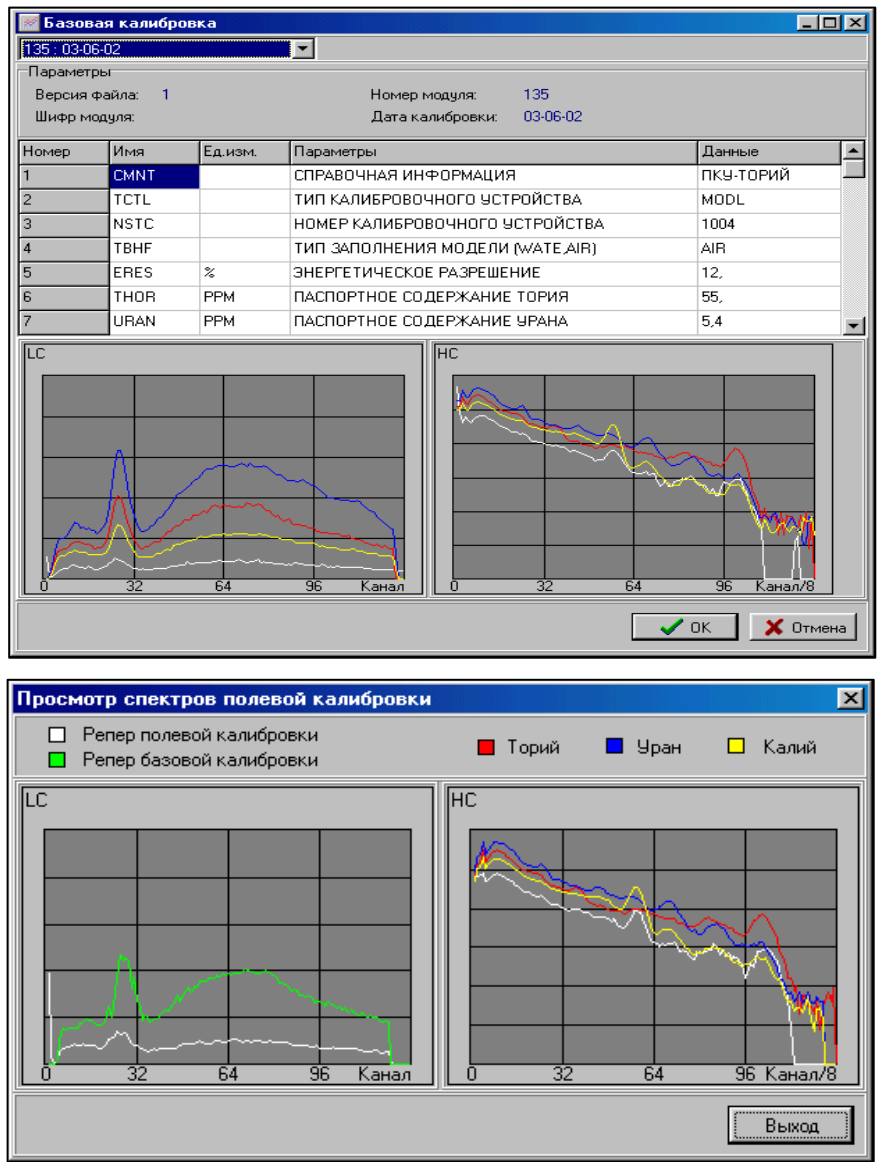
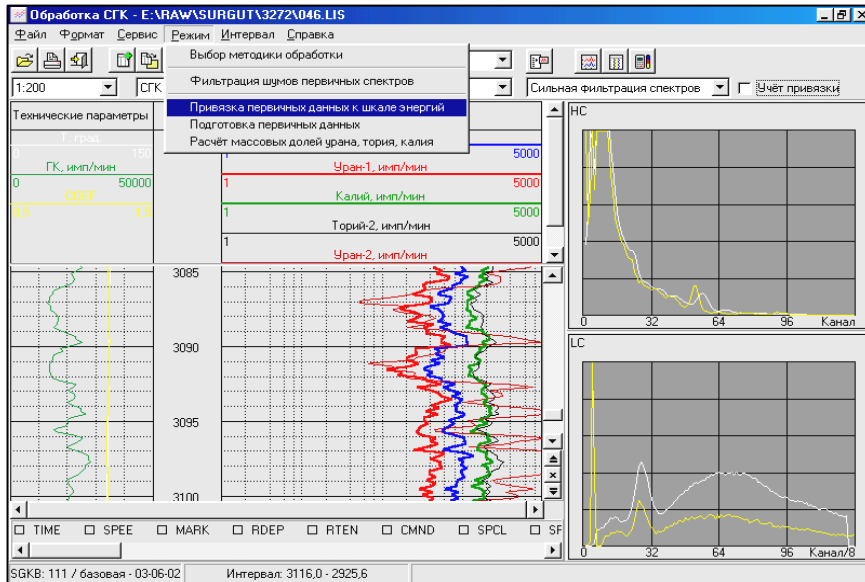


Рис. 11. Просмотр (выбор) базовой и полевой калибровок аппаратуры СГК-1024



Имя	Название	Значение
CODE	ИМЯ ПРОГРАММЫ ОБРАБОТКИ	PRMT_SGK
BNS	СТАТУС СКВАЖИНЫ (OPEN,CASE)	OPEN
DPPM	ТИП ЗАПИСИ (STAN,HIRS,HISP)	STAN
HSCD	ПРИЗНАК КОРРЕКЦИИ ЗА ДИАМЕТР СКВАЖИНЫ (NO ,YES)	NO
HC	ИСТОЧНИК КОРРЕКЦИИ ЗА ДИАМЕТР (NONE,BS ,CALI)	NONE
MwCD	ПРИЗНАК КОРРЕКЦИИ ЗА ПЖ (NO ,YES)	NO
MCDR	ПРИЗНАК ПЖ (NATU,BARI,SALT)	NATU
BHFL	ТИП ОСНОВЫ ПЖ (WATE,OIL ,AIR)	WATE
MCCD	ПРИЗНАК КОРРЕКЦИИ ЗА ГЛИНИСТУЮ КОРКУ (NO ,YES)	NO
CCCD	ПРИЗНАК КОРРЕКЦИИ ЗА ЦЕМЕНТ И КОЛОННУ (NO ,YES)	NO
FILT	ТИП ИСПОЛЬЗОВАННОГО ФИЛЬТРА (NONE,POLY)	NONE
BS (MM)	НОМИНАЛЬНЫЙ ДИАМЕТР СКВАЖИНЫ	200,
DFD (G/C3)	ПЛОТНОСТЬ ПЖ	1,
MST (DC)	ТЕМПЕРАТУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЖ	20,
CSIZ (MM)	ДИАМЕТР ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ	0,
CST (MM)	ТОЛЩИНА ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ	9,
CDEN (G/C3)	ПЛОТНОСТЬ ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ	7,8
CPD (G/C3)	ПЛОТНОСТЬ ЦЕМЕНТА	1,7

Рис. 12. Режимы первичной обработки данных СГК и документирование результатов, параметров и условий обработки в файле

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по радиометрии. - Госгеолтехиздат, М., 1957.
2. Фертл В.Х. Спектрометрия гамма-излучения в скважине. – Нефть, газ и нефтехимия за рубежом, 1983, № 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11.
3. Кожевников Д.А. Гамма-спектрометрия в комплексе геофизических исследований нефтегазовых скважин. – Методическое пособие. М.: ГАНГ, 1996.
4. O.Serra, J.Baldwin, J.Quirein – Theory, interpretation and practical applications of natural gamma ray spectroscopy. SPWLA Twenty-First Annual Logging Symposium, July 8-11,1.
5. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. - М., 2001 г.
6. Велижанин В.А., Головацкий С.Ю., Саранцев С.Н., Черменский В.Г. и др. Спектрометрический гамма-каротаж естественной активности пород: аппаратура, метрология, интерпретационно-методическое и программное обеспечения. - Каротажник, № 93, г. Тверь, 2002 г.
7. Аппаратура спектрометрического гамма-каротажа. Параметры, характеристики, требования. Методы контроля и испытаний. СТ ЕАГО-086-01. М., 2002.

**ПРОТОКОЛ
базовой калибровки аппаратуры СГК-1024Т**

Организация: _____.

Дата проведения калибровки: _____.

Номер калибруемой аппаратуры: _____.

Используемое оборудование:
-калибровочная установка номер: _____.

Результаты калибровки:

ПКУ-ЕРЭ (фон)	Торий,ppm	Уран,ppm	Калий,%
Паспортные значения
Измеренные значения
Погрешность измерений
Ст. погрешность измерений, %

ПКУ-ЕРЭ (смесь)	Торий,ppm	Уран,ppm	Калий,%
Паспортные значения
Измеренные значения
Погрешность измерений
Ст. погрешность измерений, %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модуль СГК-1024Т номер

(заключение о пригодности к работе)

Следующая калибровка должна быть проведена не позднее _____
(дата

калибровки)

Исполнитель:

(ФИО)

**Рекомендуемые форматы вывода данных базовой и полевой калибровок
на твердых копиях результатов каротажа аппаратуры СГК-1024Т**

Спектрометрический гамма-каротаж естественной активности пород Модуль: СГК-1024Т Калибровочная таблица						
Номер модуля: _____						
Номер калибровочного устройства: _____						
Тип калибровочного устройства: _____						
Предельная погрешность по торию, ppm: 1.50						
по урану, ppm: 1.50						
по калию, %: 0.30						
Параметр	Торий	Уран	Калий	Шум	Фон	Единица
1. Базовая калибровка						
THOR/Торий						ppm
URAN/Уран						ppm
POTA/Калий						%
GR/ГК						мкР/час
RW1/Торий						имп/мин
RW2/Уран						имп/мин
RW3/Калий						имп/мин
RWGR/ГК						имп/мин
2. Полевая калибровка до каротажа						
THOR/Торий						ppm
URAN/Уран						ppm
POTA/Калий						%
GR/ГК						мкР/час
RW1/Торий						имп/мин
RW2/Уран						имп/мин
RW3/Калий						имп/мин
RWGR/ГК						имп/мин
3. Полевая калибровка после каротажа						
THOR/Торий						ppm
URAN/Уран						ppm
POTA/Калий						%
GR/ГК						мкР/час
RW1/Торий						имп/мин
RW2/Уран						имп/мин
RW3/Калий						имп/мин
RWGR/ГК						имп/мин

Примечание. Пункты 2, 3 заполняется при выполнении полевой калибровки на скважине. **RW1, RW2, RW3, RWGR** – интегральные каналы тория, урана, калия и ГК, получаемые из спектров ГК-С путем суммирования счетов в определенных энергетических окнах. **THOR, URAN, POTA** – массовые содержания тория, урана и калия.

**Рекомендуемый формат вывода данных параметров обработки зонда
ГК-С на твердых копиях результатов каротажа аппаратурой
СГК-1024Т**

Модуль: СГК-1024Т	
Спектрометрический гамма-каротаж - параметры обработки	
Имя программы обработки	Prmt_sgb.exe
Дата выполнения обработки	01-01-2001
Статус скважины (OPEN, CASE)	OPEN
Тип записи (STAN, HIRS, HISP)	STAN
Признак коррекции за диаметр скважины (NO, YES)	YES
Источник коррекции за диаметр (NONE, BS, CALI)	CALI
Признак коррекции за ПЖ (NO, YES)	YES
Признак ПЖ (NATU, BARI, SALT)	NATU
Тип основы ПЖ (WATE, OIL, AIR)	WATE
Признак коррекции за глинистую корку (NO, YES)	YES
Признак коррекции за цемент и колонну (NO, YES)	YES
Тип использованного фильтра	POLY
Тип обработки данных	STAN
Номинальный диаметр скважины, мм	216.0
Плотность ПЖ, г/см ³	1.14
Температура определения параметров ПЖ, °С	20.0
Плотность фильтра ПЖ, г/см ³	1.00
Диаметр обсадной колонны, мм	_____
Толщина обсадной колонны, мм	_____
Плотность обсадной колонны, г/см ³	_____
Плотность цемента, г/см ³	_____
Массовое содержание тория в ПЖ, ppm	0.00
Массовое содержание урана в ПЖ, ppm	0.00
Массовое содержание калия в ПЖ, ppm	0.00
Массовое содержание тория в цементе, ppm	_____
Массовое содержание урана в цементе, ppm	_____
Массовое содержание калия в цементе, ppm	_____
Минимум показаний ГК, мкР/час	3.50
Показания ГК в глинах, мкР/час	14.0
Давление на забое скважины, МПа	32.0
Температура на забое скважины	95.0
Геотермический градиент, °С/100м	3.00
Средний наклон скважины, °С	15.0
Средняя скорость каротажа, м/час	100.

Примечание. В табл. 2 приняты следующие обозначения:

OPEN - необсаженные скважины;

CASE - обсаженные скважины;

STAN - стандартный (общий) режим каротажа ($\Delta h=20\text{см}$, $v=100-120\text{м/час}$);

HIRS - режим с повышенным разрешением (детальный, $\Delta h\leq 10\text{см}$, $v\leq 100\text{м/час}$);

HISP - запись с повышенной скоростью (общий режим, $\Delta h=20\text{см}$, $v\geq 120\text{м/час}$);

NO, YES - признак коррекции (НЕТ, ДА);

NONE, BS, CALI - источник коррекции за диаметр (нет коррекции, номинальный

диаметр, каверномер);

NATU, BARI, SALT – признак ПЖ (глинистая, утяжеленная, соленая);

WATE, OIL, AIR - тип основы ПЖ (водная, нефтяная, сухая скважина);

POLY, ... - тип использованного фильтра (полиномиальный, ...);

STAN, HIRS - тип обработки данных (стандартный, с высоким разрешением).

ОАО " _____ "
Трест " _____ "

УТВЕРЖДАЮ

Главный геолог

" _ " _____ 200 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
по техническому контролю качества каротажных работ
аппаратуры SGK-1024

Скважина ... Месторождение _____
НГДУ: "НСН"
СУПР

Дата исследования 13.02.01
Интервал каротажа 3285.37 - 3581.77 м
Интервал перекрытия 3285.37 - 3347.37 м

Диаметр кондуктора: ... мм
Глубина кондуктора: 670 м
Диаметр колонны: 168 мм
Глубина колонны: 2100 м
Забой: 0 м

Плотность промывочной жидкости: 1.05 г/см³
Минерализация промывочной жидкости: 0 г/л
Сопротивление промывочной жидкости: 1.0 Ом·м

Температура на забое: 85°C
Давление на забое: 38 МПа

Оператор: _____
Интерпретатор: _____
Начальник КИП: _____

Примечание:
Интервал оценки качества каротажа 3286.17 - 3325.57 м

Прибор SGKВ Номер 7

№ п/п	Кровля, м	Подошва, м	Параметр	Систематическая ppm, %	Случайная ppm, %
1.	3325.57	3320.77	THOR URAN POTA	-0.9173 -0.6081 -0.1330	1.4675 0.6698 0.2373
2.	3320.57	3315.77	THOR URAN POTA	-0.3674 -1.1462 -0.1605	1.5860 0.9400 0.2711
3.	3315.57	3310.77	THOR URAN POTA	-0.9827 -1.2204 -0.1934	1.5635 1.3801 0.3353
4.	3310.57	3305.77	THOR URAN POTA	-1.8219 -0.3780 -0.2320	1.8328 0.8146 0.3355
5.	3305.57	3300.77	THOR URAN POTA	-0.6538 -0.6693 -0.2396	0.9730 0.6364 0.3271
6.	3300.57	3295.77	THOR URAN POTA	-1.8460 -0.9478 -0.3257	1.7571 1.0189 0.3654
7.	3295.57	3290.77	THOR URAN POTA	0.5699 -0.6128 -0.3043	2.1278 1.0575 0.3899
8.	3290.77	3286.17	THOR URAN POTA	1.6694 -0.2953 -0.2342	1.6541 1.3778 0.4136

Процент выхода за допустимые границы погрешностей: 8.5000 %

Оценка качества результата: удовлетворительно

Дата: 22.10.02

**Список мнемоник регистрируемых и расчетных кривых аппаратуры
СГК-1024**

№ п/п	Мнемоника	Название
1	SPCL	Спектр нижних энергий
2	SPCH	Спектр верхних энергий
3	SHFT	Сдвиг нуля энергетической шкалы
4	COEF	Коэффициент преобразования энергетической шкалы
5	THOR	Массовое содержание тория
6	URAN	Массовое содержание урана
7	POTA	Массовое содержание калия
8	STIM	Время накопления данных (время между опросами)
9	RW1,...,RW6	Дифференциальные каналы спектрометра
10	RGRS	Интегральный канал спектрометра
11	GRS	Интегральный ГК (по данным канала RGRS)
12	SGR	Восстановленный ГК (по данным THOR, URAN, POTA)
13	CGR	Компенсированный ГК (по данным THOR, POTA)
14	TURA	Отношение торий-уран
15	UPRA	Отношение уран-калий
16	TPRA	Отношение торий-калий
17	TSGK	Температура в блоке электроники спектрометра
18	USGK	Напряжение на головке спектрометра
19	TDET	Температура в блоке детектирования спектрометра
20	AMPL	Параметр регулировки высокого напряжения
21	LEVL	Параметр регулировки уровня дискриминации
22	STRB	Параметр регулировки стробирования сигнала