

**В. Г. Черменский,
С. Н. Саранцев
НПФ "Каротаж"**

ЕДИНАЯ ИДЕОЛОГИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СПЕКТРОМЕТРОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

Спектрометрические методы исследований нефтегазовых скважин основаны на измерении скважинным прибором энергетических спектров гамма-излучения, передаче полученной информации на поверхность, ее последующем анализе. В зависимости от природы регистрируемого гамма-излучения по полученным результатам определяют различные характеристики исследуемых интервалов. Регистрируя спектры гамма-полей, обусловленные естественной радиоактивностью горных пород, определяют массовые содержания урана, тория и калия, а далее с использованием петрофизических зависимостей переходят к таким геологическим параметрам, как глинистость и фракционный состав пород. В случае, когда для возбуждения вторичного гамма-излучения применяют нейтронный или гамма-источник, регистрация спектров вторичного гамма-излучения и их последующая обработка позволяют рассчитать, соответственно, относительные содержания порообразующих элементов (кальций, кремний, железо, хлор, водород, кислород, углерод) или плотность пород и эффективный атомный номер пород, пересеченных скважиной. Интерпретация полученных данных позволяет получить информацию о литологическом составе, пористости, насыщенности изучаемого разреза.

Для реализации спектрометрических измерений гамма-излучений различной природы в НПФ "Каротаж" разработан ряд скважинных приборов (табл.).

До недавнего времени традиционный тракт преобразования гамма-спектрометра включал предварительный усилитель, управляемый интегратор, восстановитель нулевой линии, режектор наложенных импульсов, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и дискриминатор нижнего уровня, выделяющий полезный сигнал. При фиксированном коэффициенте усиления ФЭУ энергия, оставленная гамма-квантом в детекторе, прямо пропорциональна заряду, собранному управляемым интегратором с ФЭУ. Такое построение спектрометрических трактов обеспечивало достаточно высокие характеристики,

Спектрометрические приборы гамма-излучения

Скважинный прибор	Детектор	Регистрируемые величины	Примечания
СГК-1024Т	CsI(Na)	1024-канальный спектр	Спектрометрия естественного гамма-излучения (спектрометрический гамма-каротаж)
АИМС-С	BGO	24 спектра по 256 каналов каждый	Временной анализ и спектрометрия гамма-излучения неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов от импульсного нейтронного генератора (углероддиоксидный каротаж)
2ГГК-ЛП	2*NaJ(Tl)	2 спектра по 256 каналов	Спектрометрия рассеянного гамма-излучения (литолого-плотностной каротаж)
СНГК-200	BGO	256-канальный спектр	Спектрометрия гамма-излучения радиационного захвата нейтронов от ампульного нейтронного источника (спектрометрический нейтронный гамма-каротаж)

наиболее важная из которых - это линейность энергетической шкалы. Линейность шкалы особенно важна при малоканальной спектрометрии с использованием реперного гамма-источника. Нелинейная шкала исключала в принципе возможность ее стабилизации с требуемой точностью при влиянии различных дестабилизирующих факторов, например, изменении температуры сцинтилляционного детектора, ФЭУ, изменении амплитудно-частотных характеристик преобразующего тракта. В некоторых разработках вместо управляемого интегратора использовался пиковый детектор, в основе которого лежит связь между амплитудой импульса на выходе преобразователя "ток анода ФЭУ - напряжение" и зарядом, собранным с ФЭУ.

Схемы спектрометров, основанные на управляемых интеграторах и пиковых детекторах, были относительно сложными в изготовлении и настройке, содержали аналоговые ключи, исключающие перезаряд интегрирующих и запоминающих конденсаторов и обеспечивающие их последующий разряд. Кроме того, управляемый интегратор обладал по сравнению с пиковым детектором более низкой пропускной способностью, требовал исключения наложения импульсов в течение всего времени интегрирования и, соответственно, более сложного по конструкции режектора наложенных импульсов. В то же время построение спектрометров с линейной энергетической шкалой в диапазоне 50 - 200 кэВ и выше, по-видимому, трудноосуществимо, т. к. требует ввода обратной компенсационной связи в электронный тракт скважинного прибора за нелинейную зависимость в этом диапазоне световых выходов сцинтилляционных детекторов от поглощенной энергии гамма-кванта [1]. Энергетический диапазон 50 - 200 кэВ очень важен ввиду того, что именно в нем удобно располагать реперные источники для спектрометрии естественного гамма-излучения. Например, им может быть изотоп Ат-241 с энергией гамма-квантов 60 кэВ.

Появление на рынке электронных компонентов 12 - 16-разрядных АЦП с встроенными устройствами выборки-хранения (УВХ) позволило перейти к иным схемам преобразования спектрометрических трактов. Основа

данного подхода заключается в том, что измеряемые спектры гамма-излучения содержат достаточно информации, чтобы обеспечить отслеживание изменения энергетической шкалы в процессе проведения скважинных исследований. Рассмотрим типичные спектры гамма-излучений, регистрируемые скважинными спектрометрами.

На рис. 1 приведены спектры гамма-излучения естественной радиоактивности, полученные на моделях горных пород аппаратурой СГК-1024Т. Преобразование входной информации происходит 10-разрядным АЦП. Левые спектры (индекс А) - первые 128 каналов полного 1024-канального спектра или так называемая “мягкая” область спектра. Правые спектры (индекс Б) - результат приведения 1024-канального спектра к 128-канальному путем суммирования каждый раз счета из 8 соседних каналов - “жесткая” область спектра. Видно, что несмотря на невысокую разрешающую способность сцинтилляционных детекторов CsI(Na) 51*200 мм (она равна 10 - 12% по линии Cs-137), используемых в скважинных приборах СГК-Ю24Т, во всех спектрах имеются идентифицируемые линии. В “мягкой” области в 23 канале находится пик характеристического излучения от окружающего детектор свинца ($E = 75$ кэВ) [2].

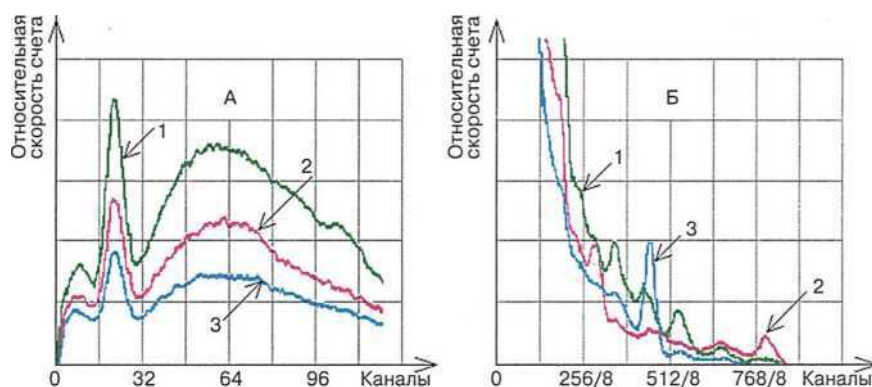


Рис. 1. Аппаратурные спектры гамма-излучения естественной радиоактивности горных пород, зарегистрированные в моделях скважинным прибором СГК-1024Т:

1 - модель с урановой активностью; 2 - модель с ториевой активностью; 3 - модель с калиевой активностью

В 460/8 канале находится пик линии полного поглощения от содержащегося в моделях с калиевой активностью изотопа калий-40 ($E = 1,46$ МэВ), в 545/8 канале - пик линии полного поглощения от содержащегося в моделях с урановой активностью изотопа висмут-214 ($E = 1,76$ МэВ). Изотоп висмут-214 является продуктом распада изотопа уран-238 и часто называется “радий С”. Канал 810/8 содержит пик линии теллур-208 ($E = 2,62$ МэВ), содержащийся в моделях с ториевой активностью. Изотоп теллур-208 является продуктом распада изотопа торий-232 и часто называется “торий” или “торий С”. Обработка зарегистрированных спектров заключается, в первом приближении, в их разложении на составляющие спектры, измеренные на трех моделях, которые содержат преимущественно калиевую, ториевую и урановую активность соответственно. Весовые коэффициенты модельных спектров, полученные в результате такого разложения, пропорциональны содержаниям в породе калия, урана и тория.

На рис. 2 приведены “типичные” для терригенных отложений спектры гамма-излучения естественной радиоактивности горных пород и

результаты обработки во всех спектрах.

Хорошо прослеживаются пик изотопа калий-40 и “жесткое” гамма-излучение ториевой природы, а в интервале 825 - 841 м появляются линии, обусловленные урановой природой, то есть очевидно, что спектры, зарегистрированные аппаратурой с достаточным количеством каналов, вполне идентифицируемы. вполне возможно, что с целью снижения статистической погрешности требуется проводить осреднение спектров для отслеживания энергетической шкалы на интервалах, превышающих квант накопления.

Типичный аппаратурный спектр рассеянного гамма-излучения от изотопа Cs-137 в модели плотности приведен на рис. 3. Спектр зарегистрирован скважинным прибором 2ГГК-ЛП, который содержит в качестве сцинтилляционного детектора кристалл NaI(Tl).

Крайний правый пик, расположенный в 102 канале, - пик от реперного источника Cs-137 с энергией 662 кэВ. Крайний левый пик, расположенный во втором канале, так называемый “аппаратурный ноль” преобразовательного тракта. Он образуется при принудительной оцифровке АЦП постоянной составляющей на его входе при отсутствии информационных сигналов. Пик, расположенный в восьмом канале, это характеристическое излучение йода, содержащегося в материале сцинтиллятора, энергия типа 31 кэВ [2]. Максимум в спектре, приходящийся на область 24 - 30 каналов, это комп-тоновское рассеяние. Как видно, на спектре рассеянного гамма-излучения отчетливо выделяются 3 точки, по которым возможно определить положение энергетической шкалы.

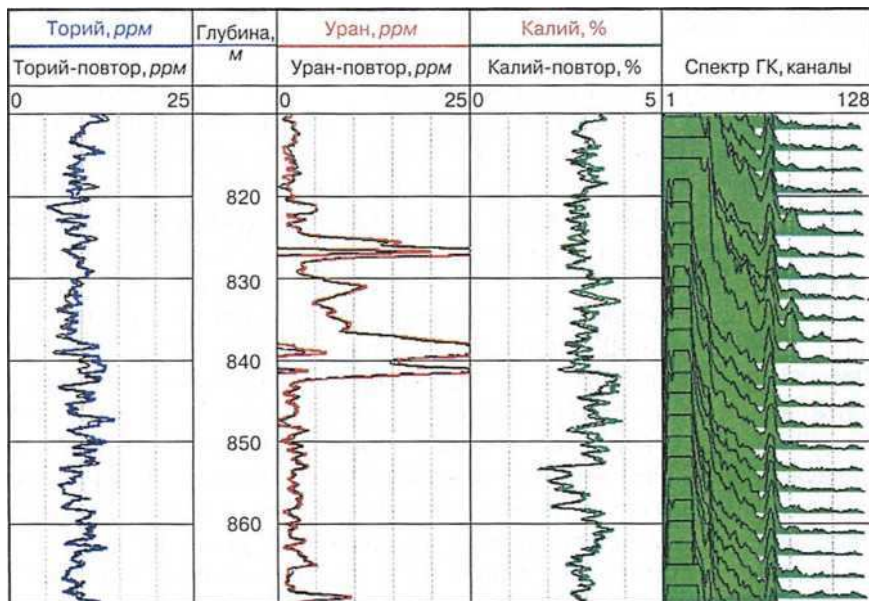


Рис. 2. Пример зарегистрированных спектров гамма-излучения естественной радиоактивности горных пород и результаты количественной обработки спектров

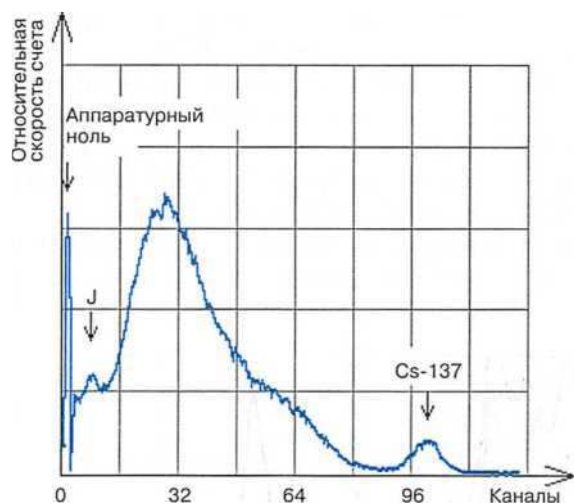


Рис. 3.
Аппаратурный спектр рассеянного гамма-излучения изотопа Cs-137

Результатом обработки регистрируемых спектров для определения плотности горных пород является отношение интенсивности рассеянного гамма-излучения на ближнем и дальнем зондах скважинного прибора (приборы гамма-гамма-каротажа содержат, как правило, два и более зондов). В энергетической области $\sim 50 - 100$ кэВ перенос гамма-квантов определяется, в основном, эффектами фотоэлектрического поглощения окружающей среды. Выделение на регистрируемых спектрах этой области позволяет получить информацию об эффективном атомном номере пород, пересекаемых скважиной.

Спектры гамма-излучения радиационного захвата тепловых нейтронов, возникающих в результате облучения горной породы генератором нейтронов или стационарным ампульным источником, представлены на рис. 4. Спектры зарегистрированы аппаратурой АИМС в моделях скважины, обсаженной стальной 168 мм обсадной колонной, толщина цементного слоя - 2 см. В качестве детектора использован сцинтиллятор на основе $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) размером 56 x 130 мм. На всех спектрах отчетливо выделяется крайний правый пик, обусловленный излучением железа, содержащегося в обсадной колонне (7,64 МэВ), и водородный пик (2,23 МэВ). Кроме этого, видны пики полного поглощения от кремния (3,54 и 4,93 МэВ), кальция (6,42 и 4,42 МэВ), хлора (6,62 и 6,11 МэВ). Обработка спектров гамма-излучения радиационного захвата и неупругогорассеяния может осуществляться аналогично обработке

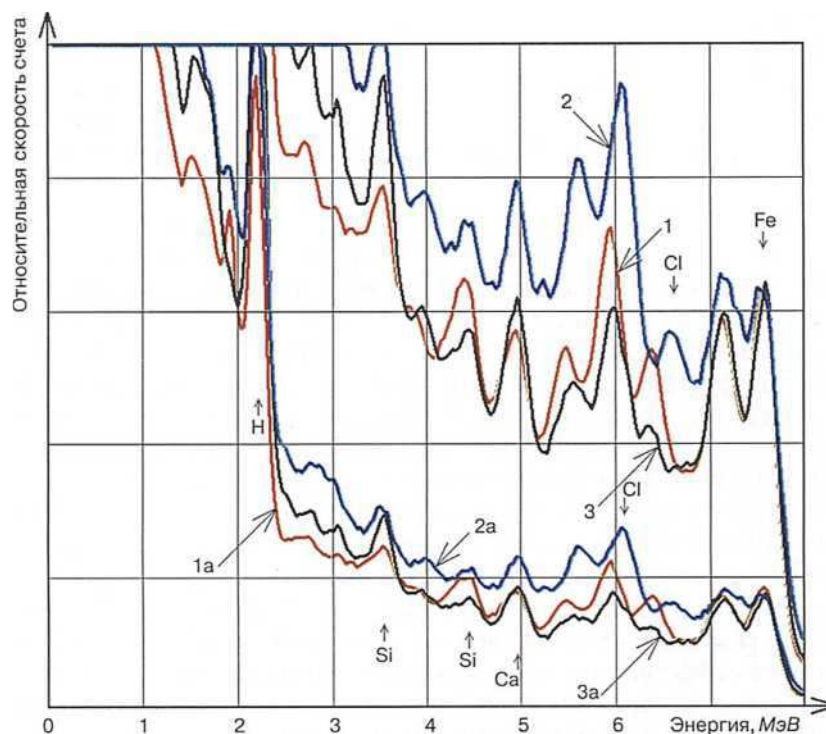


Рис. 4. Спектры гамма-излучения радиационного захвата тепловых нейтронов, зарегистрированные в моделях:
1 - известняк пористостью **0,8%** {1a - кривая в масштабе **1 : 3**}; **2** - песчаник пористостью **36%**, насыщенный минерализованной (содержание NaCl **100 г/л**) водой (2a - кривая в масштабе **1 : 3**); **3** - песчаник пористостью **36%**, насыщенный пресной водой {3a - кривая в масштабе **1 : 3**)

спектров гамма-излучения естественной радиоактивности. Однако в настоящий момент этот способ не получил широкого применения. На практике используется так называемая “оконная” обработка - исследование изменения скоростей счета в энергетических областях (окнах), где превалирует излучение изучаемого элемента. Например, отношение скоростей счета в энергетических областях **2,7 - 3,8 МэВ** и **5,1 - 6,8 МэВ** будет отражать в первом приближении изменение содержания кремния относительно содержания кальция.

Таким образом, рассмотрение спектров гамма-излучений различной природы, регистрируемых сцинтилляционными детекторами, позволяет сделать вывод, что все измеряемые спектры содержат достаточно информации для определения энергетической шкалы. Очевидно, что требования к точности определения при проведении скважинных измерений и при окончательной обработке различны.

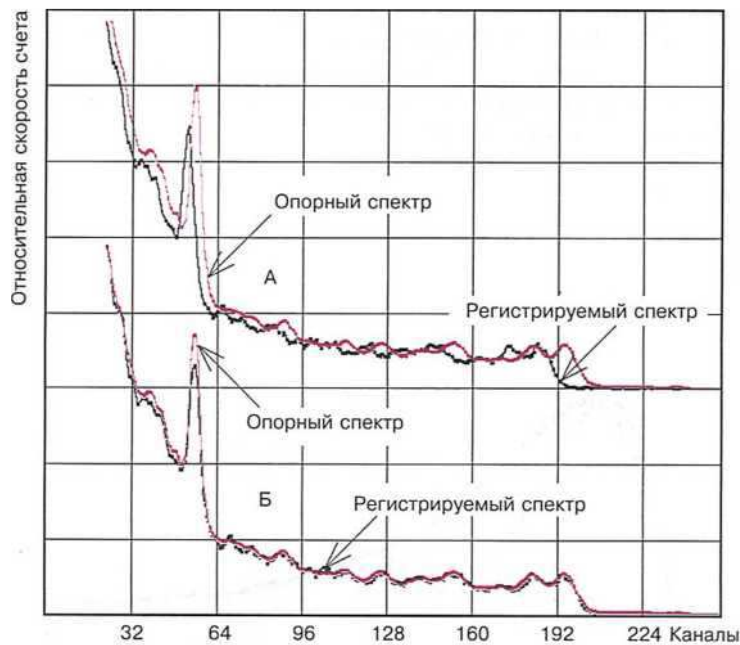


Рис. 5. Пример стабилизации спектров ГИРЗ в аппаратуре АИМС методом сравнения текущего спектра с опорным

В первом случае достаточно контролировать положение энергетической шкалы в достаточно широком “коридоре”, обеспечивающем требуемые характеристики регистрирующего тракта - необходимая разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на единицу полезной информации, отсутствие зашкаливания регистрируемых спектров и т. д. Во втором - подключение при окончательной обработке мощных средств математического анализа позволяет установить положение энергетической шкалы с требуемой точностью практически по всем регистрируемым спектрам. В реальном масштабе времени стабилизация происходит с помощью алгоритмов, реализуемых бортовым компьютером, и основанных на выравнивании текущих регистрируемых спектров с базовым изменением напряжения питания ФЭУ. В случае, когда опорный спектр имеет характерные области в начале и в конце энергетической шкалы, требования к последней упрощаются, т. к. привязка происходит по нескольким областям с известной энергией. В этом случае возможно отслеживание не только изменений коэффициента преобразования шкалы, но и смещения нуля-шкалы, изменение ее линейности. На рис. 5 приведен пример стабилизации спектров для аппаратуры АИМС углеродно-кислородного каротажа.

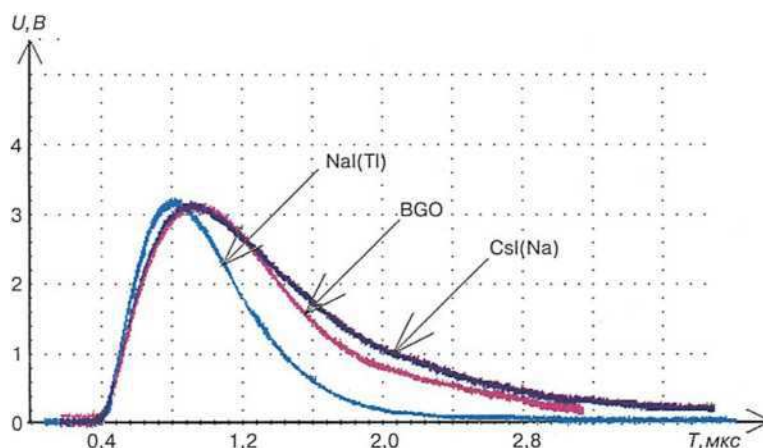


Рис. 6. Форма импульсов с выхода предварительного усилителя от различных сцинтилляционных кристаллов

В качестве опорного спектра обычно выбирается спектр из базы данных, наиболее соответствующий скважинным условиям проведения каротажа - по геологическим характеристикам, диаметру скважины-, обсадной колонне и т. д. В крайнем случае опорный спектр можно создать непосредственно перед проведением скважинных исследований, расположив скважинный прибор в наиболее характерной точке разреза и выставив необходимый коэффициент усиления. Под индексом А показан пример расхождения, получаемого при воздействии на аппаратуру дестабилизирующих факторов, - регистрируемый и опорный спектр разошлись. Под индексом Б приведен пример действия алгоритма стабилизации, приводящего к полному совпадению стабилизируемого и опорного спектров.

В другом случае, характерные области в опорных спектрах, обладающие достаточной статистикой, расположены в “мягкой” области. Очевидно, что в этом случае основное и по большому счету единственное требование к энергетической шкале спектрометра - ее неизменность при проведении калибровочных и скважинных измерений.

Скважинные приборы, реализующие методы спектрометрии независимо от модификации, построены по единой идеологии. В качестве величины, через которую определяется оставленная в детекторе гамма-квантом энергия, выступает амплитуда импульса с системы “детектор + ФЭУ + предварительный усилитель”. Многочисленные испытания различных типов детекторов показали, что положение пика информационного импульса относительно его начала при прочих равных условиях есть величина постоянная и не зависящая от энергии гамма-кванта. Однако в зависимости от типа сцинтиллятора форма импульса будет различаться. На рис. 6 приведены импульсы от различных типов детекторов на выходе предварительного усилителя.

Различные типы детекторов имеют разные времена нарастания/ спада переднего и заднего фронтов и, соответственно, разное положение пика импульса относительно его начала. Рассматриваемый подход при проектировании и построении скважинных гамма-спектрометров подразумевает преобразование в цифровой код именно амплитуд информационных сигналов. Приемлемое по надежности устройство определения пика информационного сигнала с точностью до первых десятков *наносекунд* не найдено. Поэтому было про

ведено исследование зависимости формы импульса с выхода предварительного усилителя при воздействии на систему “ФЭУ + детектор” температуры. В частности, на рис. 7 и 8 приведены осциллограммы, показывающие изменение формы импульса при прогреве

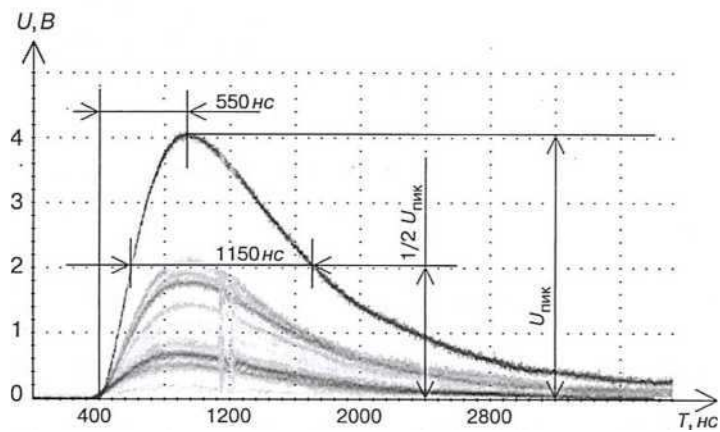


Рис. 7. Осциллограмма импульса на выходе предварительного усилителя во время прогрева детектора CsI(Na), текущая температура - 20 °C

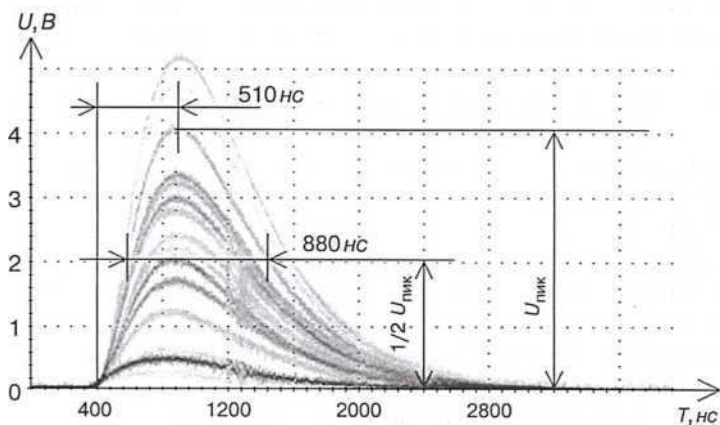


Рис. 8. Осциллограмма импульса на выходе предварительного усилителя во время прогрева детектора CsI(Na), текущая температура - 126 °C

детектора CsI(Na) совместно с ФЭУ R1847 от температуры 20 °C до 126 °C соответственно. Увеличение температуры приводит к изменению положения пика импульса относительно его начала. Естественно, что если в этом случае не принять меры по соответствующему изменению начала старта преобразования АЦП относительно информационного импульса, то будет проявляться нелинейность энергетической шкалы. Т. к. стабилизация энергетической шкалы в спектрометре естественного гамма-излучения осуществляется по “мягкой” области, то подобное изменение может привести к большим неконтролируемым ошибкам.

Многочисленные исследования детекторов показали, что наблюдаемые температурные зависимости являются характерными для каждого типа детекторов и не меняются во времени. На основании этого разработан способ корректировки температурного дрейфа формы импульса. В скважинные приборы для контроля сохранности положения энергетической шкалы введены устройства, позволяющие изменять начала преобразования “аналог - код” под управлением программ бортового компьютера и тем самым проводить тестирование аналогового

тракта. Перемещение положения начала преобразования относительно вершины импульса с правого склона на левый приводит к растяжению - сжатию энергетической шкалы. При этом самое крайнее правое положение пиков будет соответствовать положению начала преобразования на пике информационного импульса. На рис. 9 приведены результаты работы блока преобразования в цифровой код скважинного спектрометра естественного гамма-излучения СГК-1024Т без температурной коррекции (верхние спектры) и с соответствующей коррекцией (нижние спектры). Опорный спектр, зарегистрированный при температуре 20 °С, показан синим цветом. Стабилизация производилась по изменению коэффициента усиления ФЭУ таким образом, чтобы пики от характеристического излучения свинца (на нижних спектрах это пик в районе 30 канала) измеряемого и опорного спектров совпадали. Видно, что введение температурной коррекции позволяет добиться неизменности положения энергетической шкалы при изменении температуры окружающей среды. Это, в свою очередь, позволяет стабилизировать положение энергетической шкалы непосредственно в процессе проведения скважинных исследований. На рис. 10 приведены основной и повторный замеры ли того-плотностного каротажа, наглядно показывающие качество стабилизации для данного типа аппаратуры.

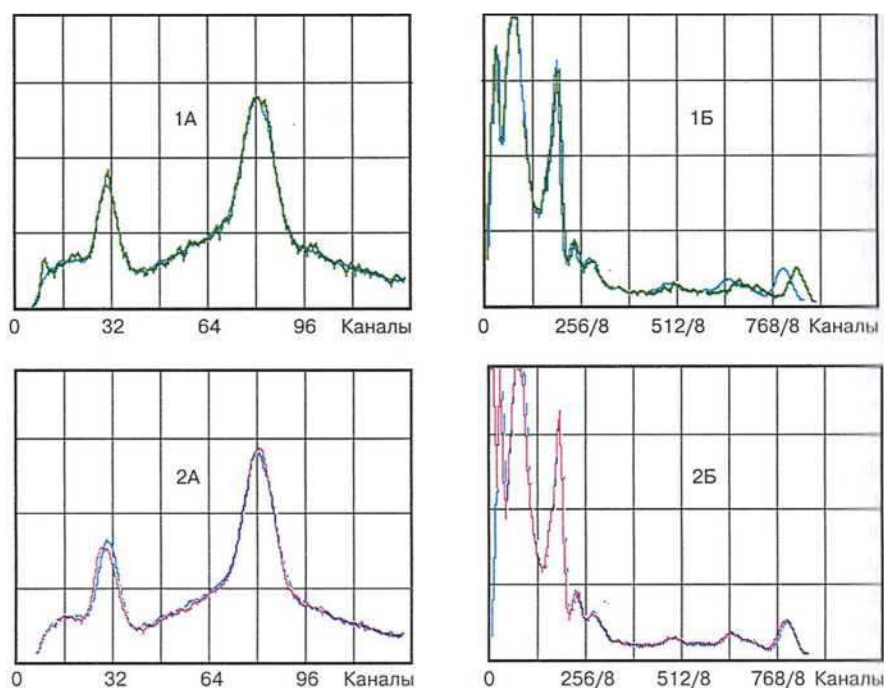


Рис. 9. Пример стабилизации энергетической шкалы спектрометра гамма-излучения естественной радиоактивности при повышении температуры с 20°С до 120°С: спектры 1А и 1Б - без учета изменения формы импульса от температуры; спектры 2А и 2Б - с корректировкой положения начала преобразования “аналог - код” в зависимости от температуры

В заключение необходимо отметить, что у идеологии построения скважинных гамма-спектрометров с применением сцинтилляционных детекторов появляется серьезный конкурент. Речь идет о создании

технологии “тотальной” оцифровки входной информации (3). Создаваемая по этому принципу аппаратура содержит следующий регистрирующий тракт: детектор излучений, согласующий усилитель, АЦП. Непрерывный режим преобразования позволяет подключить алгоритмы выделения наложенных сигналов, отделения

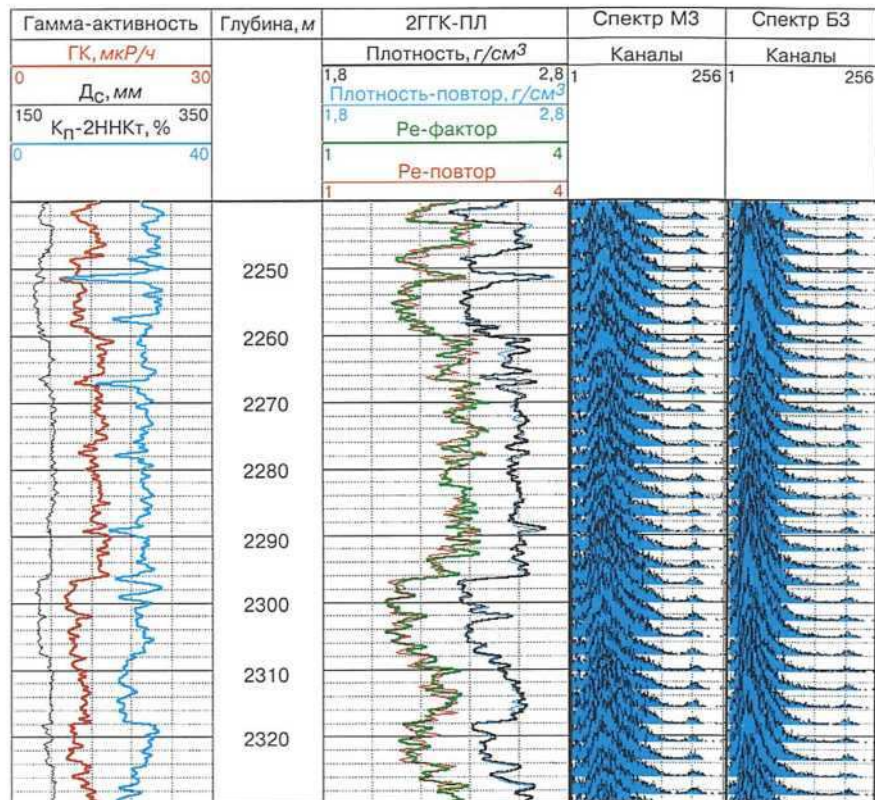


Рис. 10. Пример проведения основного и повторного замеров в скважине аппаратурой литоплотностного каротажа

шумов по форме сигнала, автоматического отслеживания нулевой составляющей и т. д. Применение для этих целей высокоскоростных сигнальных процессоров позволяет перекрыть практически весь требуемый ряд скважинных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Energy resolution, non-proportionality, and absolute light yield of scintillation crystals, P.Dorenbos, M.Marsman, C.W.E. van Eijk, Delft University of Technology, Faculty of Applied Physics, c/o IRI, Mekelwed 15, 2629 JB Delft, The Netherlands.
2. *Сторм Э., Исраэль Х.* Сечения взаимодействия гамма-излучения. Атомиздат, 1973.
3. *Хаматдинов Р. Т., Черменский В. Г., Велижанин В. А.* Проблемы и перспективы современного состояния приборостроения в радиоактивном каротаже // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2002. Вып. 101.

ОБ АВТОРАХ



Черменский Владимир Германович

Заведующий отделом радиоактивного каротажа НПФ “Каротаж”, к. т. н. Окончил в 1984 г. Свердловский горный институт. Область научных интересов - разработка аппаратуры, компьютерных технологий и методического обеспечения РК. Автор более 40 научных работ и изобретений.



Саранцев Сергей Николаевич

Научный сотрудник НПФ “Каротаж”. Окончил в 1987 г. Свердловский горный институт по специальности “геофизические методы разведки”. Область научных интересов - разработка аппаратуры, компьютерных технологий и методического обеспечения РК. Автор 12 научных работ и 3 изобретений.