УДК 550.832.55

А. А. Бубеев, В. А. Велижанин, Н. Г. Лобода
ООО "Нефтегазгеофизика"

СПОСОБ И АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО НЕЙТРОННОГО ГАММА-КАРОТАЖА, ВЫПОЛНЕННОГО АППАРАТУРОЙ СНГК-89

Выполнена оценка массовых содержаний элементов в породе на основе предложенной схемы обработки данных СНГК-89. Подтверждены надежность и эффективность работы алгоритмов, созданных авторами.

Ключевые слова: спектрометрический нейтронный гамма-каротаж, массовое содержание элементов, методика обработки.

Традиционный подход к обработке данных спектрометрического нейтронного гамма-каротажа использует схему разложения зарегистрированных спектров на спектры отдельных элементов [3–4]. Составляющими предлагаемой методики являются способ и алгоритм учета геолого-технических условий проведения каротажа и характеристик аппаратуры при реализации схемы разложения зарегистрированных спектров на спектры отдельных элементов, а также метрологическое сопровождение обработки данных СНГК.

Таким образом, в основе методики обработки спектров аппаратуры СНГК-89 лежит схема разложения зарегистрированных

спектров на модельные спектры элементов путем решения системы уравнений:

$$AY = S + E, \quad (1)$$

где A – матрица размерностью $k \times n$, столбцами которой являются модельные спектры элементов (n – количество энергетических каналов в спектре, k – количество модельных спектров, на которые производится разложение исследуемого спектра); Y – определяемые относительные вклады модельных спектров в исследуемый спектр; S – исследуемый спектр; E – вектор ошибок.

Однако в отличие от [4, 5] при обработке данных аппаратуры СНГК-89 разложению подвергается не весь зарегистрированный спектр, а лишь пластовая составляющая излучения. Для этого исследуемый (регистрируемый аппаратурой) спектр $S(E)$ рассматривается как сумма спектров [2], сформированных несколькими геометрическими зонами (прибором, скважиной и пластом):

$$S(E) = S_{\text{пл}}(E) + S_{\text{скв}}(E) + S_{\text{пр}}(E), \quad (2)$$

где $S_{\text{пл}}(E)$, $S_{\text{скв}}(E)$, $S_{\text{пр}}(E)$ – составляющие излучения пласта, скважины и прибора соответственно. Тогда пластовая составляющая регистрируемого спектра может быть записана в виде

$$S_{\text{пл}}(E) = S(E) - S_{\text{скв}}(E) - S_{\text{пр}}(E). \quad (3)$$

Ясно, что для решения системы уравнений (1), а также выделения пластовой составляющей излучения необходимо обеспечить идентичность энергетических шкал и разрешения всех участвующих в обработке спектров – регистрируемого, приборного, скважинного и модельных. На рис. 1 приведен пример выделения пластовой составляющей регистрируемого спектра до согласования энергетического разрешения спектров $S(E)$, $S_{\text{скв}}(E)$, $S_{\text{пр}}(E)$ (рис. 1, *а*) и после согласования энергетического разрешения (рис. 1, *б*). Несогласованность энергетического разрешения в 2% по линии водорода уже приводит к серьезному искажению выделенной пластовой составляющей спектра излучения (рис. 1, *а*). На рис. 2 приведены зависимости погрешности определения массовых содержаний элементов, обусловленные несогласованностью энергетических шкал исследуемого и модельных спектров. Приведенные зависимости были получены путем деформации (сжатия и растяжения) спектров,

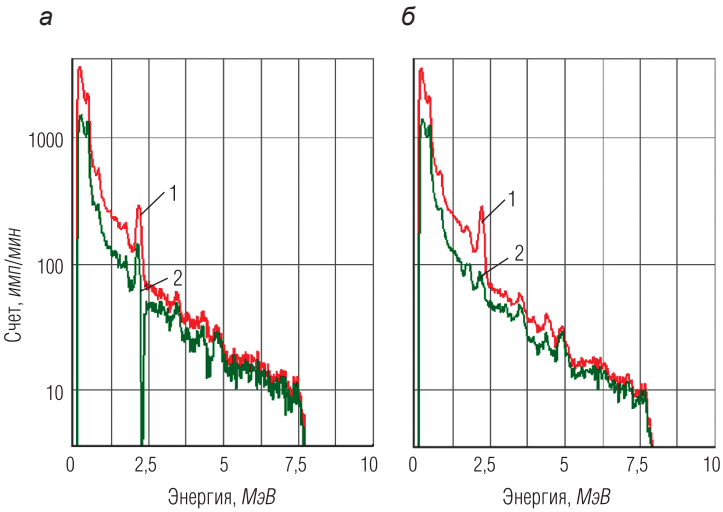

Рис. 1. Влияние несогласованности энергетического разрешения на корректность выделения пластовой составляющей регистрируемого спектра:
1 – регистрируемый спектр $S(E)$; *2* – спектр излучения пласта $S_{пл}(E)$; *а* – до согласования энергетического разрешения; *б* – после согласования энергетического разрешения спектров $S(E)$, $S_{скв}(E)$ и $S_{пр}(E)$

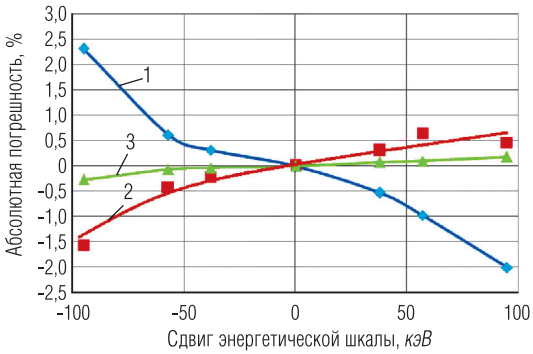

Рис. 2. Абсолютная погрешность определения массовых содержаний элементов, обусловленная несогласованностью энергетических шкал исследуемого и модельных спектров. Сдвиг энергетической шкалы указан для линии железа 7650 *кэВ*:
1 – кальций; *2* – кремний; *3* – водород

зарегистрированных аппаратурой СНГК-89 на моделях с известным содержанием элементов.

Схема обработки данных, зарегистрированных аппаратурой СНГК-89, состоит из следующих этапов:

– согласование энергетических шкал и разрешений измеренных и модельных спектров;

– формирование пластовой составляющей излучения и разложение ее спектра пластовой составляющей излучения на модельные спектры;

– определение массовых содержаний элементов.

Здесь в список модельных спектров включены спектр излучения прибора, получаемый при калибровке аппаратуры СНГК-89, и спектр излучения скважины, формируемый из модельных спектров элементов на основе данных о скважинных условиях измерений. Рассмотрим каждый из этапов обработки более подробно.

Согласование энергетических шкал измеренных и модельных спектров

Зарегистрированные аппаратурой СНГК-89 данные представляют собой 512-канальные спектры. В процессе каротажа вследствие изменения внешних условий (в основном температуры) происходит искажение энергетической шкалы регистрируемого спектра. На рис. 3 приведен характерный пример изменения энергетической шкалы регистрируемых спектров в процессе каротажа. Несогласованность энергетических шкал при выполнении процедуры разложения зарегистрированных спектров приводит к увеличению погрешности определения массовых содержаний элементов. Анализ исследований, проведенных на аппаратурных спектрах и спектрах, полученных математическим моделированием, показал, что для обеспечения точности определения массовых содержаний кальция и кремния в пределах 2–3%, водорода и хлора 0,2% и т. д. рассогласование энергетических шкал в рабочем диапазоне от 1800 до 8000 *кэВ* не должно превышать 40–60 *кэВ*. Несогласованность энергетических шкал вносит свою погрешность и при формировании спектра излучения пласта. Однако влияние этого фактора на конечный результат определения массовых содержаний элементов не исследовалось, а рассматривалось только на качественном уровне при оценке формы спектра.

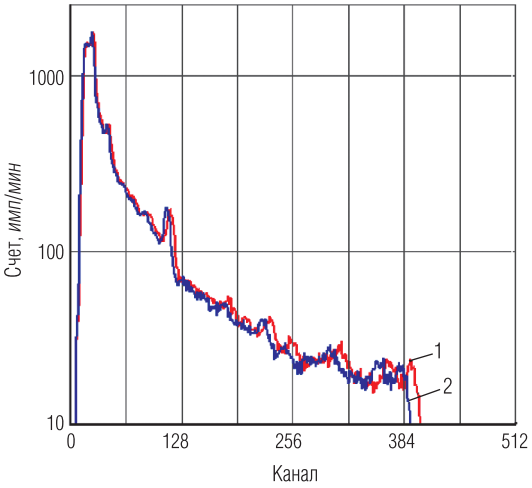

Рис. 3. Изменение энергетической шкалы в процессе каротажа:
1 – температура детектора 30 °С; *2* – температура детектора 40 °С

Процедура согласования энергетических шкал заключается в определении методом наименьших квадратов коэффициентов a и b линейного преобразования энергетической шкалы текущего спектра $S(E)$ к энергетической шкале опорного спектра $S_o(E)$:

$$\sum_{n=1}^{N}\left[S_o(E) - S(a\cdot E + b)\right]^2 = \min_{a,\,b}, \qquad (4)$$

где a – коэффициент преобразования энергетической шкалы; b – сдвиг нуля энергетической шкалы.

Опорный спектр формируется из модельных спектров, полученных в основном математическим моделированием, в соответствии с техническими условиями измерений (пресная или минерализованная промывочная жидкость (ПЖ)) и типом разреза (терригенный, карбонатный). Наилучшее качество стабилизации энергетической шкалы достигается при наибольшем совпадении конфигураций опорного и регистрируемого спектров. Использование расчетных спектров, в отличие от калибровочных аппаратурных, повышает качество стабилизации энергетической шкалы. Эти спектры имеют согласованные энергетические шкалы и регулируемое энергетическое

разрешение. Точность стабилизации энергетической шкалы в рамках данного подхода в диапазоне энергий 1500–8000 *кэВ* обеспечивается на уровне не ниже 25–30 *кэВ*.

Рассматривалась также возможность формирования опорного спектра по результатам предварительно выполненного разложения зарегистрированного спектра. Но в этом случае требования к стабилизации энергетической шкалы при выполнении каротажа сильно возрастают. Стабилизация энергетической шкалы в процессе каротажа в настоящее время осуществляется по линии водорода, и ее погрешность не превышает 20–25 *кэВ*. По линии железа погрешность энергетической шкалы относительно модельного спектра в этом случае может достигать 50–90 *кэВ*. Сильно деформированная энергетическая шкала может привести к некорректному определению списка элементов, которые должны участвовать в формировании опорного спектра. В этом случае алгоритм стабилизации энергетической шкалы работает нестабильно.

Согласование энергетических разрешений измеренных и модельных спектров

Изменение температуры и загрузки спектрометрического тракта приводит к изменению энергетического разрешения регистрируемых спектров. Несогласованность энергетического разрешения регистрируемых и модельных спектров при выполнении разложения в первую очередь увеличивает погрешность определения водорода. Как следствие, возрастает погрешность определения и других элементов. Рассогласование энергетического разрешения на 1,5% увеличивает погрешность определения водорода на 0,3%, при этом содержание водорода в породе в общем случае не превышает 1–2%. Погрешность определения других элементов может достигать 2–3%. Так же, как и в случае с согласованием энергетических шкал, влияние несогласованности энергетических разрешений при формировании спектра излучения пласта рассматривалось на качественном уровне при оценке формы спектра (рис. 1).

Как уже отмечалось ранее, модельные спектры в основном формируются по результатам математического моделирования с энергетическим разрешением в соответствии с шириной канала. Измеренные спектры имеют существенно худшее разрешение,

чем модельные. Поэтому задачу согласования энергетического разрешения спектров легче решать путем ухудшения разрешения модельных спектров.

Для согласования энергетического распределения модельных спектров, полученных математическим моделированием, с энергетическим разрешением спектров, зарегистрированных аппаратурой СНГК-89, используется распределение Гаусса со стандартным отклонением $\sigma(E)$:

$$S_{\text{ап}}(E_0) = \int_0^{10} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(E)}} S_{\text{расч}}(E) \exp\left(-\frac{(E - E_0)}{2\sigma^2(E)}\right) dE,$$

где E_0 – энергия аппаратурного спектра; E – поглощенная энергия, $S_{\text{расч}}(E)$ – расчетный спектр поглощенной энергии; $S_{\text{ап}}(E_0)$ – аппаратурный спектр. Величина $\sigma(E)$ непосредственно связана с энергетическим разрешением, и поскольку согласование разрешения спектров осуществляется по водородному пику, то ее удобно записать в виде

$$\sigma(E) = \{R_{\text{Н}} \cdot r(E) \cdot E\}/2{,}35, \qquad (5)$$

где $R_{\text{Н}}$ – разрешение зарегистрированных спектров по пику водорода; $r(E)$ – функция, характеризующая зависимость разрешения от энергии регистрируемой частицы (определяется по модельным замерам с реальной аппаратурой).

При согласовании разрешений модельных спектров, полученных на натурных моделях, воспользоваться вышеописанной схемой напрямую нельзя. Это связано с тем, что аппаратурные спектры изначально имеют некоторое разрешение $R_{\text{Н ап}}$, а функция Гаусса не является ни аддитивной, ни мультипликативной относительно разрешения (стандартного отклонения). При изменении (ухудшении) разрешения аппаратурных модельных спектров стандартное отклонение $\sigma(E)$ вычисляется по формуле

$$\sigma(E) = \{R_C \cdot r(E) \cdot E\}/2{,}35, \qquad (6)$$

где R_C – кажущееся разрешение, которое необходимо дополнительно наложить на аппаратурный спектр (не нулевого разрешения) для получения спектра с разрешением $R_{\text{Н}}$.

Кажущееся разрешение R_C находится по функциональной зависимости $f(R_{\text{Н}})$, которая была получена путем исследования спектров

математического моделирования. На рис. 4 представлена функциональная зависимость $f(R_H)$, построенная для модельных спектров с начальным разрешением по водороду 7%.

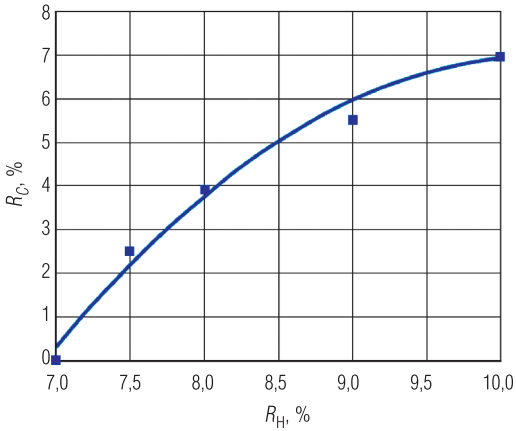

Рис. 4. Зависимость дополнительного кажущегося разрешения R_C, которое необходимо наложить на аппаратурный спектр с начальным разрешением 7% по водороду для получения спектра с разрешением R_H

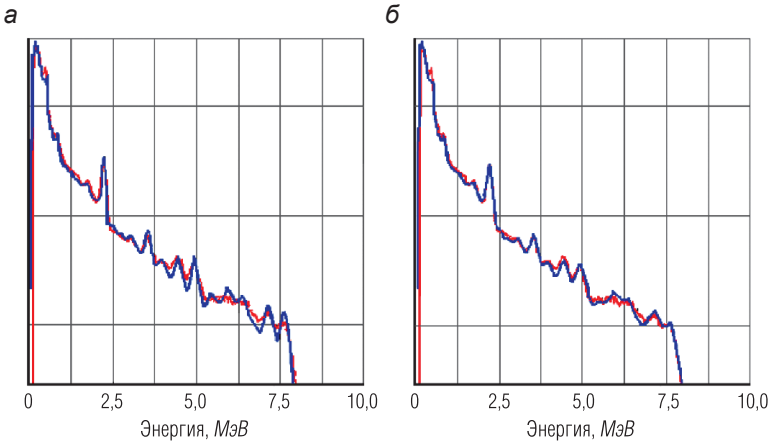

Рис. 5. Измеренный (красный) и восстановленный (синий) спектры СНГК-89 до и после согласования энергетического разрешения

На рис. 5 показана работа схемы согласования энергетического разрешения спектров по водородному пику. В этом примере разрешение модельных спектров значительно меньше разрешения зарегистрированного спектра. Это отчетливо видно из сопоставления зарегистрированного спектра со спектром, восстановленным по результатам разложения (рис. 5, *а*). После проведения согласования энергетического разрешения восстановленный спектр намного лучше воспроизводит зарегистрированный спектр (рис. 5, *б*).

Предлагаемая схема согласования энергетического разложения была опробована на скважинном материале. Тестирование показало, что данный подход позволяет получить достаточно точные параметры согласования энергетического разрешения без построения итерационных схем, требующих дополнительных временных затрат.

Выделение пластовой составляющей излучения

Как уже было сказано выше, регистрируемый аппаратурой СНГК-89 спектр $S(E)$ можно рассматривать как сумму спектров, сформированных излучением прибора, скважины и пласта.

В работе [2] по результатам моделирования методом Монте-Карло было показано, что спектр излучения прибора слабо зависит от условий измерений и является стандартным для данного типа аппаратуры. При его формировании необходимо учитывать только мощность источника А:

$$S_{\text{пр}}(E) = \text{A} \cdot \varphi_{\text{пр}}(E), \tag{7}$$

где $\varphi_{\text{пр}}(E)$ – спектр излучения прибора для единичной мощности источника.

Там же было показано, что спектр излучения скважины, при наличии близкого по длине зонда тепловых нейтронов, можно представить в виде

$$S_{\text{скв}}(E) = \text{A} \cdot F_{\text{скв}}(N_{\text{т}}, d_{\text{с}}, \sigma_{\text{пж}}, C_{\text{пж}}) \cdot N_{\text{т}} \cdot \varphi_{\text{скв}}(E), \tag{8}$$

где $F_{\text{скв}}(N_{\text{т}}, d_{\text{с}}, \sigma_{\text{пж}}, C_{\text{пж}})$ – палеточная зависимость; $d_{\text{с}}$ – диаметр скважины; $\sigma_{\text{пж}}$ – плотность ПЖ; $C_{\text{пж}}$ – минерализация ПЖ; $N_{\text{т}}$ – поток тепловых нейтронов, у. е.; $\varphi_{\text{скв}}(E)$ – спектр излучения скважины для единичной мощности источника, который формируется из спектров элементов в соответствии с составом промывочной жидкости.

В соответствии с (8) амплитуда спектра излучения скважины зависит от мощности источника А, диаметра скважины d_c, минерализации $C_{пж}$ и плотности $\sigma_{пж}$ раствора, а также от распределения поля тепловых нейтронов в системе пласт–скважина. Минерализация и плотность раствора определяются техническими условиями проведения каротажа и считаются постоянными (условно) в интервале исследования. Диаметр скважины определяется по данным кавернометрии либо используется его номинальное значение. Поток тепловых нейтронов определяется по показаниям малого зонда нейтронного каротажа аппаратуры СРК-76, который по длине полностью соответствует длине зонда аппаратуры СНГК-89. Палеточная зависимость $F_{скв}(N_т, d_c, \sigma_{пж}, C_{пж})$ была определена методом Монте-Карло применительно к использованию показаний малого зонда аппаратуры СРК-76 и представляет собой монотонную, слабо меняющуюся функцию. На рис. 6 приведен пример палеточной зависимости для ряда значений d_c, $\sigma_{пж}$ и $C_{пж}$.

Таким образом, задав технические условия проведения каротажа и располагая данными нейтронного каротажа, мы имеем возможность сформировать скважинную составляющую излучения с последующим выделением пластовой составляющей. Следует отметить, что корректность формирования пластовой составляющей во многом определяется соответствием задаваемых при обработке технических условий реальным условиям проведения каротажа.

Влияние этих факторов рассмотрим на конкретном скважинном материале. На рис. 7, *а* приведен пример выделения пластовой составляющей из спектра, зарегистрированного в скважине диаметром 216 *мм*, заполненной пресной промывочной жидкостью плотностью 1,16 *г/см*^{3}. Изменение номинального диаметра скважины приводит к деформации пластового спектра в водородном окне с энергией 2,00–2,40 *МэВ* (рис. 7, *б*). Следствием увеличения диаметра скважины является пониженный счет в водородном окне на спектре пластовой составляющей излучения. В случае уменьшения диаметра скважины счета, напротив, возрастают. Изменение диаметра скважины на 10 *мм* приводит к увеличению погрешности определения массового содержания водорода в породе на 0,2–0,3%. Как следствие этого, погрешность определения других элементов возрастает до 1%. В случае минерализованной ПЖ ошибка в задании номинального диаметра скважины приводит к еще большим погрешностям. В этом случае

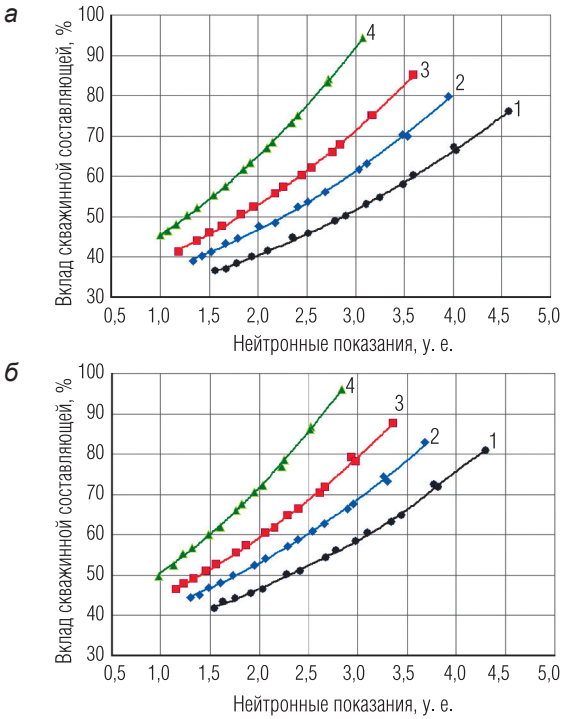

Рис. 6. Зависимость вклада излучения скважины в спектр аппаратуры СНГК-89 от технических условий измерений:
а) d_c = 216 *мм*; *б*) d_c = 244 *мм*; *1* – $C_{пж}$ = 0 *г/л* NaCl; *2* – $C_{пж}$ = 50 *г/л* NaCl; *3* – $C_{пж}$ = 100 *г/л* NaCl; *4* – $C_{пж}$ = 250 *г/л* NaCl

конфигурация спектра излучения скважины более сложная и при выделении пластовой составляющей спектр деформируется во всем диапазоне энергий. Следует также отметить, что при отсутствии водорода в списке определяемых элементов породы влияние диаметра скважины на погрешность определения остальных элементов снижается в 5–10 раз. Тем не менее с целью уменьшения погрешностей при обработке данных СНГК в открытом стволе необходимо использовать данные каверномера.

Существенное искажение спектра излучения пласта и, как следствие, увеличение погрешности определения массовых содержаний

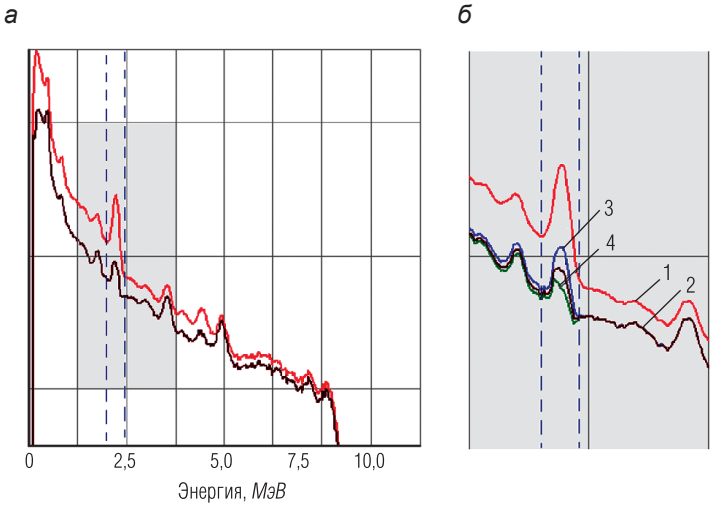

Рис. 7. Влияние номинального диаметра скважины на результат выделения пластовой составляющей (d_c = 216 *мм*, $\sigma_{пж}$ = 1,16 *г/см*^{3}, $C_{пж}$ = 0 *г/л* NaCl): *1* – полный зарегистрированный спектр; *2* – спектр пластовой составляющей излучения; *3* – спектр пластовой составляющей излучения при d_c = 226 *мм*; *4* – спектр пластовой составляющей излучения при d_c = 206 *мм*

элементов происходят при некорректном указании типа ПЖ в скважине. Замена пресного раствора на минерализованный приводит к искажению спектра пластовой составляющей (рис. 8). В результате такой ошибки получение адекватных данных при дальнейшем вычислении массовых содержаний элементов будет невозможно. В рассматриваемом примере (d_c = 216 *мм*, $\sigma_{пж}$ = 1,16 *г/см*^{3}) увеличение минерализации ПЖ в скважине на 30 *г/л* NaCl приводит к увеличению погрешности определения водорода на 1%, железа на 2,5%, натрия на 0,5% и т. д. Снижение минерализации ПЖ приводит к меньшей погрешности определения содержаний элементов. В этом случае происходит систематическое смещение искомых параметров по всему стволу скважины, а именно увеличивается определяемое содержание хлора и уменьшается содержание водорода. В терригенных отложениях исключение водорода из списка определяемых элементов приводит к уменьшению (в 3–4 раза) влияния минерализации ПЖ на погрешность определения остальных элементов

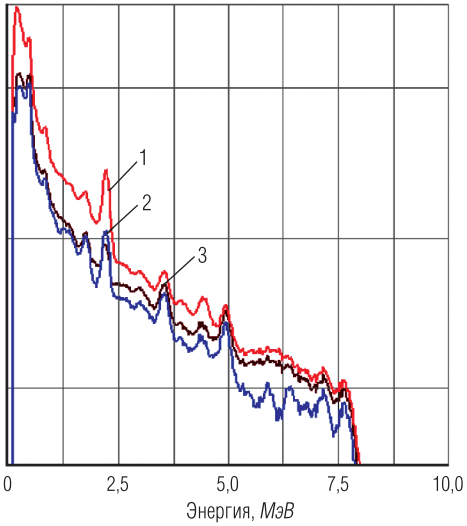

Рис. 8. Влияние минерализации раствора на корректность выделения пластовой составляющей (d_c = 216 *мм*, $\sigma_{пж}$ = 1,00 *г/см*^{3}, $C_{пж}$ = 0 *г/л* NaCl):
1 – полный зарегистрированный спектр; *2* – спектр пластовой составляющей излучения при $C_{пж}$ = 0 *г/л* NaCl; *3* – спектр пластовой составляющей излучения при $C_{пж}$ = 100 *г/л* NaCl

породы. В карбонатных отложениях исключение водорода не позволяет увеличить точность определения элементов.

Из всего вышесказанного следует, что при обработке данных СНГК особое внимание необходимо уделять этапам предварительной подготовки спектров (согласованию энергетических параметров) и заданию технических условий проведения каротажа.

Разложение спектра пластовой составляющей излучения на модельные спектры

На следующем этапе обработки выполняется разложение выделенного пластового спектра на модельные спектры отдельных элементов путем решения системы уравнений (1). Для ее решения используется метод взвешенных наименьших квадратов:

$$Y = (A^t \cdot W \cdot A)^{-1} A^t \cdot W \cdot S, \qquad (9)$$

где W – весовая матрица размерностью $n \times n$, с отличными от нуля диагональными элементами $W_{ii} = 1/\sigma_i^2 = 1/S_i$. Решение системы (9) осуществляется в итерационном процессе, на каждом шаге которого вычисляется ковариационная матрица, использующая результаты выполненного разложения и условие неотрицательности решения. Поскольку данные условия используются только на этапе вычисления ковариационной матрицы, то они не могут привести к смещению результатов.

Для оценки качества разложения используется коэффициент невязки

$$k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left(S_i - S_i^{\text{в}}\right)^2}{S_i^{\text{в}\,2}}, \qquad (10)$$

где S_i – значение i-го канала исследуемого спектра; $S_i^{\text{в}}$ – значение i-го канала спектра, восстановленного из модельных спектров по результатам разложения.

Значение, которое принимает коэффициент невязки, зависит от статистики исследуемого спектра. Типичное его значение для первичных спектров аппаратуры СНГК-89 не превышает 0,1 при условии качественно выполненного разложения. Значения коэффициента невязки более 0,1 указывают на некорректно выполненное разложение.

Основной причиной некачественно выполненного разложения является несогласованность энергетических шкал исследуемого и модельных спектров. На рис. 9 показана эффективность оценки качества разложения по коэффициенту невязки. В интервале 3120–3150 (выделен голубым цветом) коэффициент невязки имеет характерные значения 0,015–0,035. В интервале 3160–3190 (выделен серым цветом) наблюдается увеличение значения коэффициента невязки до 0,16. При просмотре спектров в этом интервале записи отчетливо видна несогласованность энергетических шкал зарегистрированного и восстановленного спектров.

Исследование коэффициента невязки показало, что минимальные значения коэффициент имеет в том случае, когда набор модельных спектров соответствует реальному составу породы. Отсутствие в наборе модельных спектров элемента, реально присутствующего в породе, приводит к увеличению значения коэффициента невязки.

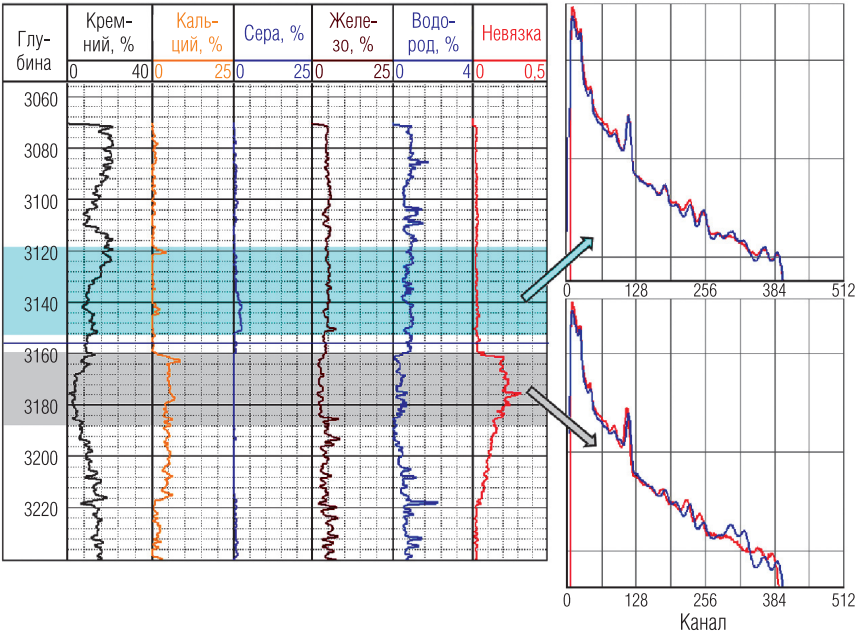

Рис. 9. Зависимость коэффициента невязки от согласованности энергетических шкал спектров

Например, при исследовании полевошпатовых отложений включение спектра натрия в набор модельных спектров позволяет уменьшить коэффициент невязки в 1,2 раза. В то же время расширение набора модельных спектров за счет элементов, чьи вклады в регистрируемый спектр незначительны либо вообще отсутствуют, приводит к увеличению временных затрат на обработку данных и росту погрешности разложения. В связи с этим такие элементы, как натрий, титан, гадолиний, не включены в стандартный набор определяемых элементов, их участие в разложении определяет интерпретатор в соответствии с представлениями о литологии породы.

Определение массовых содержаний элементов

На завершающем этапе обработки данных СНГК производится расчет массовых содержаний элементов в породе.

При вычислении массовых содержаний элементов используется модель “замыкания” оксидов, предложенная в 1980-х годах и подробно описанная в зарубежной литературе [4]. Массовое содержание элементов в этой модели вычисляется по формуле

$$M_i = F \cdot Y_i / C_i,$$

где Y_i – относительный вклад i-го элемента в зарегистрированный спектр; C_i – спектральная чувствительность детектора для i-го элемента; F – нормировочный множитель.

Нормировочный множитель вычисляется из условия, при котором сумма весовых долей оксидов, входящих в состав модели породы, должна равняться единице:

$$F \cdot \Sigma\{X_i \cdot Y_i / C_i\} = 1,$$

где X_i – оксидный множитель, учитывающий весовые доли кислорода и углерода, входящих в состав модели. Численно оксидный множитель равен отношению молекулярной массы соответствующего оксида или карбоната i-го элемента к атомной массе i-го элемента.

Спектральная чувствительность C_i представляет собой коэффициент пропорциональности между относительным вкладом i-го элемента в зарегистрированный спектр и его массовым содержанием в породе. Значение спектральной чувствительности детектора C_i зависит от многих факторов, в частности, от вероятности захвата тепловых нейтронов i-м элементом, характеристик измерительного тракта и конструктивных особенностей аппаратуры. Предварительные значения чувствительностей были рассчитаны теоретически с привлечением данных математического моделирования. Но в силу того, что при математическом моделировании невозможно учесть влияние всех аппаратурных характеристик, теоретические значения нуждаются в уточнении по данным, полученным на физических моделях.

Проведение замеров на моделях известняка, песчаника с различной пористостью и минерализацией флюида позволило произвести оценку чувствительностей для кальция, кремния, хлора и водорода. Отсутствие физических моделей серы, натрия, титана и гадолиния затрудняет определение чувствительностей для этих элементов. Они корректировались по скважинным измерениям из общих представлений о составе породы. В таблице приведены значения чувствительностей для определяемых элементов.

Таблица

Значения спектральной чувствительности аппаратуры СНГК-89 для ряда элементов

Определяемый элемент	Значения чувствительности	
	Теоретические	Экспериментальные
Кальций	0,59	0,55
Кремний	0,35	0,45
Хлор	23,89	20,8
Сера	0,81	0,83
Железо	1,96	1,2
Гадолиний	3500	3500*
Титан	7,0	7,0*
Натрий	0,92	2,2*
Водород	2,00	4,8

* Чувствительности, нуждающиеся в уточнении.

Выводы

Предлагаемая схема обработки данных аппаратуры СНГК-89 была опробована на скважинном материале [1]. Проведенный анализ показал целесообразность выделения пластовой составляющей излучения при обработке материалов СНГК и корректность используемого для этого палеточного обеспечения. Была подтверждена надежность работы алгоритмов на этапах предварительной подготовки измеренных и модельных спектров к выполнению процедуры разложения, что позволило минимизировать погрешность определения массовых содержаний элементов, обусловленную изменяющимися в процессе каротажа характеристиками спектрометрического тракта аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бубеев А. А., Велижанин В. А., Лобода Н. Г., Тихонов А. Г.* Некоторые результаты модельных и скважинных испытаний оценки массовых содержаний элементов по данным спектрометрического нейтронного гамма-каротажа // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2010. № 8. С. 67–79.

2. *Лобода Н. Г., Велижанин В. А., Бубеев А. А.* Математическое моделирование спектрометрического нейтронного гамма-каротажа // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2010. № 7. С. 50–69.

3. *Galford J. E., Hertzog R. C., Flaum C. and Galindo G.* Improving Pulsed Neutron Gamma-Ray Spectroscopy Elemental Weigth Percent Estimates through Automatic Dimensioning of Spectral Fitting Process. Paper 18151 presented at the 83rd SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 2–5 October. 1988.

4. *Grau J. A., Schweitzer J. S.* Elemental Concentrations from Gamma-Ray Spectroscopy Logs // Nucl. Geophys. 1988. Vol. 2. № 3. P. 175–181.

5. *Hertzog R. et al*. Geochemical Logging with Spectrometry Tools. Paper 16792 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 27–30 September. 1987.

Рецензент Б. Е. Лухминский