

**Винокуров А.Н., Ильин И.В., Лобив И.В.,
Мурзин Ф.А., Половинко О.Н., Семич Д.Ф.**

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО КАРОТАЖА НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

ВВЕДЕНИЕ В ЯДЕРНО-МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Существующие геофизические методы и технологии оценки текущей и остаточной нефтеводонасыщенности разрабатываемых нефтяных пластов либо недостаточно достоверные, либо дорогостоящие и неоперативные. Это особенно характерно для месторождений нефти с низкой и ультранизкой минерализацией пластовых вод, а также для эксплуатируемых месторождений нефти с закачкой в пласты пресной воды для поддержания пластового давления (некоторые месторождения Башкортостана, Татарстана, Пермской области и др.).

Мировой опыт, прежде всего фирм Шлюмберже, Халибартон и Дрессер Атлас, свидетельствует, что в таких условиях удовлетворительные результаты по оценке текущей и остаточной нефтенасыщенности могут быть получены по данным углеродно-кислородного каротажа, реализуемого с применением современной скважинной программно-управляемой спектрометрической аппаратуры с высокочастотным генератором нейтронов на 14 МэВ, быстрого канала регистрации и телеметрии. А также с помощью энергетического и временного анализа вторичных излучений различной физической природы, создания эффективного программно-методического и метрологического обеспечения [1–6].

Благодаря конверсии ВПК и доступности современной вычислительной техники, подобная аппаратура была разработана ОАО НПП ВНИИГИС в 1997 году, а в 1997–1999 годах проведены научно-исследовательские работы по её промышленной апробации и обработки методики измерений в нефтегазовых скважинах нефтяных месторождений Поволжья.

В настоящем проекте методических рекомендаций обобщен первый опыт применения отечественной технологии для оценки нефтеводонасыщенности коллекторов нефти. В методических рекомендациях изложены физические основы метода, обоснованы аналитические параметры для

оценки коэффициентов нефтеводонасыщенности в различных физико-геологических условиях, рассмотрено влияние мешающих факторов, способы качественной и количественной интерпретации данных С/О-каротажа, аппаратура и программное обеспечение метода.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УГЛЕРОДНО-КИСЛОРОДНОГО КАРОТАЖА

Физической основой углеродно-кислородного каротажа является процесс неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах элементов, приводящих к переходу в активное состояние различных энергетических уровней. Для относительно лёгких породообразующих элементов (от углерода до железа) число возбужденных уровней оказывается небольшим, в силу чего они испускают ограниченное количество гамма-линий. По энергии и интенсивности потока последних представляется возможным идентифицировать и количественно оценить содержание в среде i -го элемента.

Для неупругого рассеяния нейтрона в веществе необходимо, чтобы его энергия была достаточна для прохождения хотя бы самых низких энергетических уровней атомов вещества, т. е. была как минимум $E_n = 1 \div 2.0$ МэВ. Далее замедление нейтронов осуществляется за счёт упругих соударений с ядрами, переходящее затем в термализацию и диффузию надтепловых и тепловых нейтронов. Таким образом, все перечисленные физические процессы, непрерывно сменяя друг друга, разделены во времени. Из теоретических оценок следует, что в горных породах длительность процесса неупругого рассеяния составляет порядка $1.0 \div 4.0$ мкс, упругого рассеяния и термализации до $50 \div 100$ мкс и диффузии до $1000 \div 2000$ мкс.

Основные породообразующие элементы могут быть идентифицированы по спектрам ГИНР и ГИРЗ на основе оптимальной временной и энергетической селекции гамма-излучения.

Наиболее эффективным параметром для оценки нефтенасыщенности пластов может являться величина отношения потоков гамма-излучения от ядер углерода и кислорода в спектрах ГИНР, закономерно изменяющаяся как в терригенных, так и карбонатных коллекторах в зависимости от их пористости и элементного состава.

Приведённые на рис. 1 зависимости представляют собой отношение массовых долей элементов в моделях силикатного состава, имитирующие нефтеводонасыщенные пласты. В спектрах ГИРЗ наиболее контрастно проявляются такие элементы, как водород, хлор, железо, кремний, кальций, с меньшей вероятностью — сера, магний.

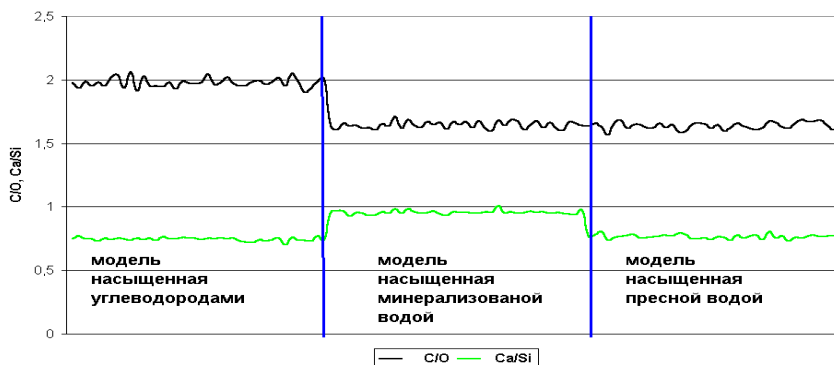


Рис. 1. Показание параметров C/O и Ca/Si в моделях силикатного состава различной насыщенности при $K_n=40\%$

Поэтому эта информация представляет интерес, в первую очередь, для выделения и оценки пористости пластов и определения компонентного состава горных пород, слагающих разрезы скважин.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЁТА ИНДЕКСОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАНИЯ ПЛАСТА

Энергетическая привязка спектров

На первом этапе обработки энергетических спектров необходимо произвести энергетическую привязку. По характерным фотопикам произвести интерполяцию, при которой ось абсцисс каналов (амплитуда зарегистрированных сигналов в единицах АЦП) отображается в ось энергий путем линейной интерполяции. Все последующие расчеты выполняются исходя из пары ось абсцисс–ось энергий и не требует вмешательства оператора.

Сложность данной процедуры состоит в том, что данный процесс имеет большой субъективный фактор. Интерпретатор должен хорошо знать взаимодействие нейтронов с веществом как быстрых нейтронов, так и тепловых. Он должен уметь различать характерные фотопики на спектрах неупругого рассеяния, радиационного захвата и наведенной активности. Он также должен знать энергию гамма-квантов естественной радиоактивности (ряд урана, ряд тория, калий), правильно их интерпретировать.

Все это накладывает большие требования к знаниям в ядерной физике и геофизике и опыту при обработке энергетических спектров. При этом правильность выполнения энергетической привязки может иметь погрешность в силу субъективных и технических причин. К примеру, изменение спектра при низкой температуре неэффективно из-за низкой статистики высокоэнергетических гамма-квантов.

Алгоритм, который будет описан ниже, имеет целью повысить точность энергетической привязки не менее чем в два раза и устранить субъективный фактор при решении данной задачи.

Обрабатываемые данные

Входными данными являются энергетические спектры различных видов. Типичный энергетический спектр приведен ниже.

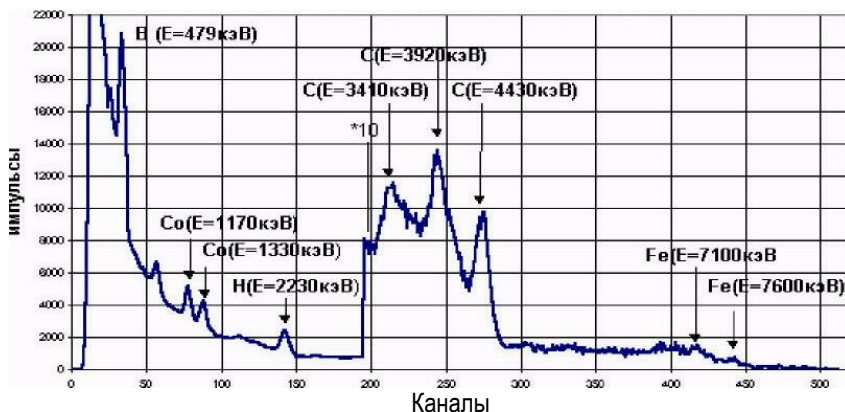


Рис. 2. Спектр гамма излучения полученный от источников CO-GO, Po-Be

По оси абсцисс расположены каналы, или энергии вспышек. По оси ординат откладывается количество зарегистрированных вспышек на данном интервале времени. Для большей наглядности, начиная со 180-ого канала, амплитуда увеличена в 10 раз.

На рис. 2 видны фотопики, соответствующие отдельным элементам. Некоторым элементам соответствует несколько фотопиков. Например, железу соответствует три фотопика. Два из них показано на графике. Третий, находящийся левее данных двух, не показан. Он почти не проявляется в силу наличия шумов.

Обработка временных спектров

Типичный временной спектр приведён на рис. 3. Известно, что с точностью до шумов небольшой амплитуды спектр состоит из трёх частей, характеризующих отклик от ближней, средней и дальней зон.

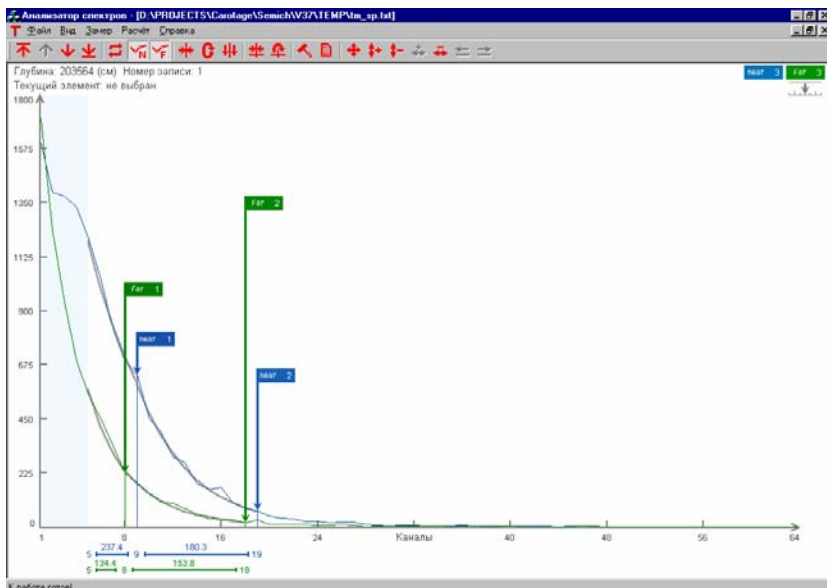


Рис. 3. Типичный временной спектр

Обозначим временной спектр $T(i)$, где i — номер отсчёта по времени, в нашем случае $1 \leq i \leq 64$. В типичных случаях существуют точки $i_0 < i_1 < i_2 < i_3$ такие, что на каждом из интервалов $I_k = [i_{k-1}, i_k]$, $k = 1, 2, 3$ спектр представляет собой экспоненту вида $f_k(x) = e^{-\lambda_k(x+x_0^k)}$, $k = 1, 2, 3$.

Далее можно считать, что $i_0 = 4$. При $i = 1, 2, 3$ мы имеем неустойчивость работы аппаратуры.

Известно также, что в типичных случаях i_1 , i_2 , i_3 находятся в окрестностях точек 10, 20, 30 соответственно. Значения $T(i)$ при $i > 35$ не представляют интереса.

Для того чтобы локализовать i_1 , i_2 , используется дискретное вейвлет-преобразование, построенное на основе вейвлета Добеши DB4.

На спектре $S(i)$ вейвлет-преобразования в окрестностях точек 10 и 20 имеются пики большой амплитуды. Они локализуют место изменения параметра λ , т.е. i_1 , i_2 .

Более того, полагаем i_1 равное такому i , что $8 \leq i \leq 12$ и $|S(i)|$ достигает максимума в указанной окрестности. Заметим, что во всех примерах, которые были просчитаны, такая точка была только одна. Точку i_2 выбираем аналогично на интервале $27 \leq i \leq 33$.

Вблизи точки 30 на спектре также имеются два локальных максимума наибольшей амплитуды. Часто они имеют разные знаки.

Детальный анализ показывает, что они не характеризуют место изменения параметра λ . Их появление вызвано тем, что более высокочастотные гармоники «загашивают» неточность приближения исходного сигнала линейной комбинацией низкочастотных гармоник. Поэтому для нахождения i_3 используется другой метод.

Сначала подсчитаем суммы $\sum_k = \sum_{j=k}^{64} T(j)$, $10 \leq k \leq 64$.

Легко видеть, что $\sum_{10} \geq \sum_{11} \geq \dots \geq \sum_{64}$. В программной реализации указанные сумм подсчитываются в обратном порядке.

Пусть $M = \sum_{10}$, C — некоторая константа, причём $C = 1/10$. Находим:

$$\sum_{k-1} > C \cdot M \geq \sum_k.$$

Если $k > i_2$, то полагаем $i_3 = k$. В противном случае полагаем $i_2 = k$ и считаем, что спектр распадается не на три, а на два участка $[i_0, i_1]$, $[i_1, i_2]$. Отметим ещё, что k не может быть расположено левее i_1 , так как там значения $T(i)$ большие, а вся описанная выше технология направлена на «отсечение» хвоста, почти сплошь состоящего из нулей.

Дальнейшая обработка состоит в следующем. Переходим к спектру, определённом не на номерах каналов (т.е. на номерах временных отсчётов) к спектру, а определённом на реальном времени в микросекундах, полагая

$$\mathbf{T}(x_i) = T(i), \quad x_i = 60 + i \cdot 40.$$

Имеется три соответствующих множества

$$X_1 = \{x_i : i_0 \leq i \leq i_1\},$$

$$X_2 = \{x_i : i_1 \leq i \leq i_2\},$$

$$X_3 = \{x_i : i_2 \leq i \leq i_3\}.$$

На каждом из участков

$$\mathbf{T}(x_i) \approx e^{\lambda_k(x+x_0^s)}, \quad k=1,2,3.$$

Поэтому параметры экспонентов можно вычислить, используя логарифмирование и метод наименьших квадратов для линейной функции.

Нас интересуют величины $\tau_k = 1/\lambda_k$, $k=1, 2, 3$, характеризующие времена жизни гамма-квантов, приходящих из ближней, средней и дальней зон.

В случае, когда средняя зона вырождается, сливаясь с ближней, получаем два значения τ_1, τ_2 .

В алгоритме предусмотрена возможность усреднения значений λ , соответственно τ аналогично медианной фильтрации.

Фиксируем небольшое h , обычно $h=3, 4, 5$.

Полагаем $i_0=4$, i_1 находим при помощи вейвлет-преобразования. Далее рассмотрим отрезки вида $[i_0, i]$, $i-h \leq i \leq i_1+h$.

Для каждого такого отрезка подсчитываем своё λ , заметим, что их нечётное число. Полагаем λ_1 равным медиане из полученных значений λ . Это означает, что если все данные λ упорядочим по возрастанию, то h штук будет $\leq \lambda_1$ и h штук $\geq \lambda_1$. Именно так работает медианный фильтр, подавляющий импульсные помехи.

Соответственно корректируем i_1 : берём именно то i , которому соответствует данное медианное. На следующем участке действуем аналогично. Мы имеем новое i_1 и рассматриваем отрезки вида

$$[i_2, i], \quad i_2-h \leq i \leq i_2+h.$$

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЁТА ИНДЕКСОВ И ДРУГИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАНИЯ ПЛАСТА

Программа «Анализатор спектров» запоминает форму фотопиков, которые пользователь указывает вручную и далее, используя их форму, осуществляет начальную привязку на всех замерах по глубине. В правой части отображается изменение положения фотопика, которое определила программа. Основное окно программы представлено на рис. 4.

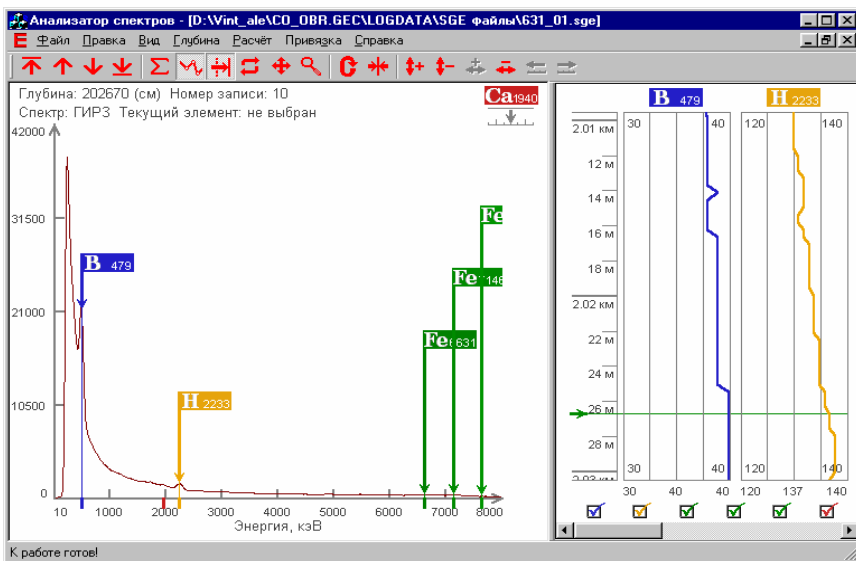


Рис. 4. Основное окно программы «Анализатор спектров»

Отметим, что на горизонтальной оси теперь отображаются энергии в кэВ, а не каналы. Также на оси энергии вертикальными штрихами (маркерами) отмечено, где должны располагаться определяемые для энергетической привязки прочие (неосновные) фотопики. Маркеры и одноименные флажки имеют одинаковый цвет.

Программа позволяет проконтролировать качество привязки, сделанной программой, и внести свои поправки. Для этого необходимо пролистать спектры, двигаясь по замерам вниз по глубине, и проконтролировать положение курсоров на фотопиках и изменение показания кривой динамики положения фотопика в правой части.

После приведения спектров к энергетической шкале и учёта теплового дрейфа переходят непосредственно к расчету основных показателей.

Для дальнейшего использования расчетные данные могут быть сохранены в LAS-формате. Этот формат поддерживают большинство геофизических интерпретационных пакетов программ. Для этого существует в меню пункт Файл, «Экспорт», причем подменю «Экспорт» позволяет сохранить расчетные данные в LAS-формате «Экспорт результатов...», а также сохранить приведенные и энергетически привязанные спектры ГИНР и ГИРЗ. «Экспорт ГИНР и ГИРЗ...» осуществляет экспорт спектров в текстовый формат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Новиков Г.Ф., Копков Ю.Н.** Радиоактивные методы разведки. — Л.: «Недра», 1965. — 755 с.
2. **Хуснуллин М.Х.** Геофизические методы контроля разработки нефтяных пластов. — М.: «Недра», 1989. — 188 с.
3. **Резванов Р.А.** Радиоактивные и другие неэлектрические методы исследования скважин. — М.: «Недра», 1982. — 367 с.
4. **Алексеев Ф.А., Головацкая И.В., Гулин Ю.А. и др.** Ядерная геофизика при исследовании нефтяных месторождений. — М.: «Недра», 1978. — 359 с.
5. **Фертл В.Х.** Спектрометрия естественного гамма-излучения в скважине // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. — 1986. — № 3–11.
6. **Kozhevnikov D.A., Shagin V.L.** A method of treating the spectral response of a tool in open and cased boreholes to determine the natural radioactivity of rocks // Nucl. Geophys. — 1989. — Vol.3, №. 1. — P. 17–29.