

Информационные сообщения

*В. А. Велижанин, В. А. Беляков, А. А. Волнухина, В. С. Лисицын,
Н. Г. Лобода, С. Ф. Слепнев, И. Ю. Степанов, Г. К. Точиленко
ООО «Нефтегазгеофизика»*

АППАРАТУРА ИМПУЛЬСНОГО СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖА АИМС-90

Приведены основные технические характеристики, представлены результаты скважинных испытаний аппаратуры.

Ключевые слова: спектрометрическая импульсная нейтронная аппаратура, пористость, сечение захвата, массовое содержание, скважинные исследования.

Аппаратура АИМС-90 с зондовой установкой ИННК-НТ + 2ИННК-Т + ИНГК-С предназначена для проведения спектрометрического импульсного нейтронного каротажа с целью определения пористости, сечения поглощения тепловых нейтронов и массовых содержаний элементов породы в разрезах нефтяных и газовых скважин. Технические характеристики аппаратуры АИМС-90 приведены в табл. 1.

Зонд ИННК-НТ выполняет функцию монитора для учета выхода генератора нейтронов и нормировки спектров гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов (ГИНР).

Зонд 2ИННК-Т обеспечивает оценку пористости и сечения захвата тепловых нейтронов породы в скважинах с открытым и с закрытым стволом.

Учет влияния скважинных условий на результаты оценки пористости породы зондом 2ИННК-Т выполняется путем многомерной аппроксимации измеряемого параметра А:

$$A = [(N_{M3}(k_n)/N_{B3}(k_n)]/[N_{M3}(k_n = 100)/N_{B3}(k_n = 100)],$$

где $N_{M3}(k_n)$, $N_{B3}(k_n)$ – показания (скорость счета в имп/мин) малого (М3) и большого (Б3) зондов соответственно в пласте с пористостью k_n .

Это обеспечено наличием интерпретационных зависимостей от влияния диаметра скважины в диапазоне от 120 до 350 мм, плотности и минерализации промывочной жидкости (ПЖ) в диапазоне от 1,0 до 1,8 г/см³ и от 0 до 250 г/л NaCl соответственно, а также от толщины и плотности промежуточной среды между прибором и стенкой скважины, диаметра и толщины обсадной колонны, плотности цементного камня. Кроме того, зонд 2ИННК-Т обеспечен поправками за влияние минерального состава, сечения захвата и плотности породы. На рис. 1 приведена основная зависимость показаний зонда 2ИННК-Т аппаратурой АИМС-90 от пористости породы в открытом стволе, которая описывает связь между пористостью известняка, представленного чистым кальцитом, и показаниями аппаратурой А в стандартных условиях измерений [1].

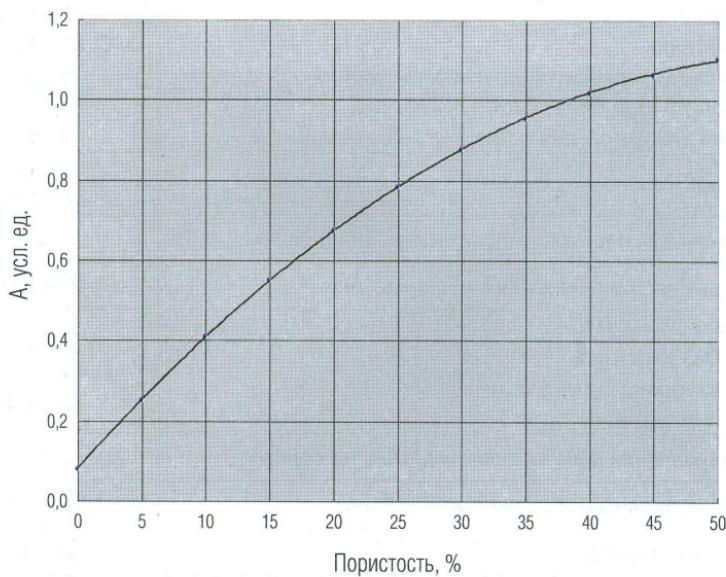


Рис. 1. Основная зависимость зонда 2ИННК-Т (открытый ствол)

Таблица 1

Технические характеристики аппаратуры АИМС-90

Длина, мм	3566
Максимальный диаметр, мм	90
Масса, кг, не более	100
Число каналов регистрации	3
Канал ИННК-НТ, монитор:	
тип детектора	гелиевый, типа СНК
Канал 2ИННК-Т измерения пористости и сечения захвата: тип детектора	гелиевый, типа СНК 0–40
диапазон измерения пористости, %	$\pm[4,2 + 2,3(40/k_n - 1)$
основная относительная погрешность измерений, %	4–40
диапазон измерения сечения захвата, с.и.	$\pm 2,5$
основная относительная погрешность измерений, %	
Канал ИНГК-С измерения массовых содержаний элементов и сечения захвата: тип детектора	BGO Ca, Si, Fe, Na, Cl, S, O, C, Mg, Ti, Al, Gd и др.
определяемые породообразующие элементы	
диапазон измерений сечения захвата, с.и.	4–40
основная относительная погрешность измерений, %	$\pm 2,5$
Диапазон рабочих температур, °C	от -10 до +120
Верхнее значение рабочего гидростатического давления, МПа	80
Диапазон диаметров исследуемых скважин, мм	110–350
Скорость каротажа, м/ч: режим С/О-каротажа	30–35
режим измерения пористости	400–600
режим литосканера	200–400
Время установления рабочего режима, мин, не более	10
Активность источника излучения, н/с, не более	$14,1 \text{ МэВ}, 1,5 \times 10^8$
Положение в скважине	На стенке

Оценка сечения захвата $\Sigma_{\text{пл}}$ по данным зонда 2ИННК-Т выполняется в рамках двухкомпонентной модели, описываемой выражением

$$N(t) = C_{\text{скв}} \times \exp(-t/\tau_{\text{скв}}) + C_{\text{пл}} \times \exp(-t/\tau_{\text{пл}}), \quad (1)$$

где $\tau_{\text{скв}} = 4550/\Sigma_{\text{скв}}$ – время жизни нейтронов в скважине (в ближней зоне); $\tau_{\text{пл}} = 4550/\Sigma_{\text{пл}}$ – время жизни нейтронов в пласте; $C_{\text{скв}}, C_{\text{пл}}$ – амплитуды этих зон при разложении временного спектра соответственно. Основная зависимость зонда ИННК-Т_{МЗ} аппаратуры АИМС-90, описывающая связь между пористостью известняка (кальцита) и значением сечения захвата $\Sigma_{\text{пл}}$ в скважине диаметром 196 мм, приведена на рис. 2. На нем показана также теоретическая зависимость сечения захвата от пористости кальцита.

Переход от $\Sigma_{\text{пл}}$ к истинному значению сечения поглощения породы Σ_a выполняется в рамках модели [2, 4, 5]

$$\Sigma_a = \Sigma_{\text{пл}} + \Delta\Sigma_{\text{dif}}. \quad (2)$$

Здесь $\Delta\Sigma_{\text{dif}}$ – диффузионная поправка. В (2) используются зависимости, полученные для скважин диаметром от 120 до 350 мм при минерализации ПЖ до 300 г/л NaCl как в открытом, так и в закрытом стволах.

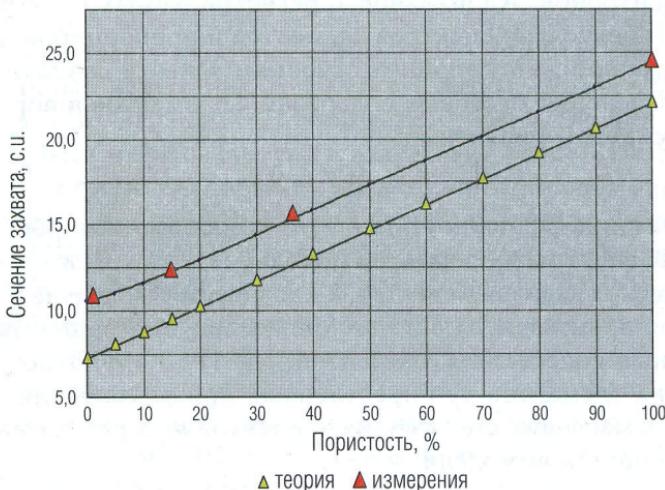


Рис. 2. Основная зависимость сечения захвата от пористости для ее оценки с помощью зонда ИННК-Т_{МЗ} (открытый ствол)

Регистрируемые временные и энергетические спектры зонда ИНГК-С аппаратуры АИМС-90 обеспечивают оценку сечения захвата нейтронов и массовых содержаний элементов породы. Оценка сечения захвата по данным ИНГК-С выполняется также в рамках двухкомпонентной модели с введением диффузионной поправки. На рис. 3 приведены основная и теоретическая зависимости сечения захвата от пористости кальцита для зонда ИНГК-С.

Оценка массовых содержаний элементов выполняется по результатам разложения зарегистрированных спектров гамма-излучения неупругого рассеяния (ГИНР) $S_{\text{гинр}}(E_\gamma)$ и радиационного захвата (ГИРЗ) $S_{\text{гирз}}(E_\gamma)$ нейtronов на соответствующие моноэлементные спектры. В основе такого подхода лежит тот факт, что спектры ГИНР и ГИРЗ можно записать в виде суммы спектров элементов $S_{i, \text{гинр}}(E_\gamma)$ и $S_{i, \text{гирз}}(E_\gamma)$ соответственно:

$$\begin{aligned} S_{\text{гирз}}(E_\gamma) &= \Phi_t \times \sum S_{i, \text{гирз}}(E_\gamma) \times \sigma_{a, i}, \\ S_{\text{гинр}}(E_\gamma) &= \sum \langle \sigma_{in, i} \rangle \times S_{i, \text{гинр}}(E_\gamma), \end{aligned} \quad (3)$$

где Φ_t – поток тепловых нейтронов; $\sigma_{a, i}$ – сечение захвата на i -м элементе породы; $\langle \sigma_{in, i} \rangle = \int \sigma_{in, i}(E) \times \Phi_{nt}(E) dE$ – усредненное сечение неупругого рассеяния на i -м элементе; Φ_{nt} – поток надтепловых нейтронов. Аддитивность регистрируемых спектров ГИНР и ГИРЗ относительно спектров элементов и пропорциональность их амплитуды соответствующим сечениям захвата создают возможность определения массовых содержаний элементов в породе путем решения системы уравнений:

$$AY = S, \quad (4)$$

где A – матрица размерностью $k \times n$, столбцами которой являются модельные спектры S_i элементов породы; $i = 1, \dots, k$; n – количество энергетических каналов в спектре; k – количество модельных спектров, на которые производится разложение исследуемого спектра; Y_i – относительные содержания элементов; $i = 1, \dots, k$. Относительные содержания элементов Y_i , определенные при разложении, пересчитываются в массовые содержания элементов m_i в рамках выбранной интерпретационной модели породы

$$m_i = F \times Y_i / C_i,$$

где C_i – спектральная чувствительность канала для i -го элемента, F – нормировочный множитель.

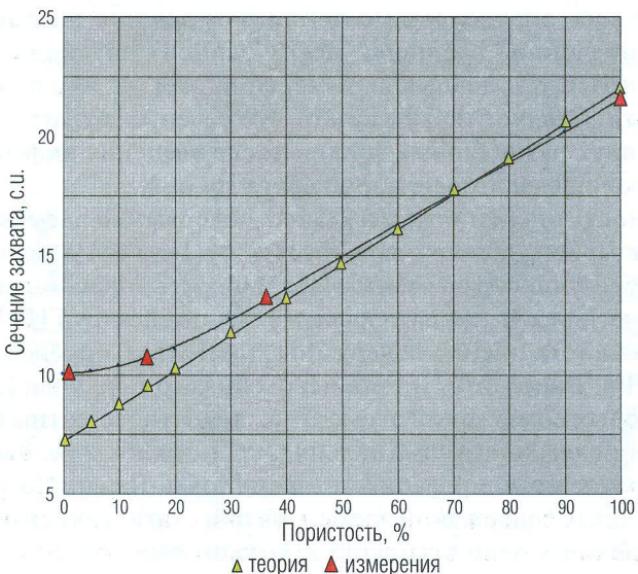


Рис. 3. Основная зависимость сечения захвата от пористости зонда ИНГК-С для ее оценки с помощью зонда ИНГК-С (открытый ствол)

Современная аппаратура АИМС-90 обеспечивает определение массового содержания Ca, Si, Fe, Na, Cl, S, O, C, Mg, Ti, Al, Gd и H.

Скважинные испытания аппаратуры АИМС-90 проводились на месторождениях Западной Сибири в режимах С/О-каротажа (в закрытом стволе) и литосканера (в открытом стволе). На рис. 4 и 5 приведены результаты основного и повторного замеров определения пористости с помощью 2ИННК-Т, сечения захватов нейтронов по данным ИННК-Т_{M3} и ИНГК, а также относительных содержаний Ca, Si, Na, Fe, S, Cl, H, Al, C и H в породе по данным ИНГК-С. Замеры выполнены в режиме литосканера в скважине диаметром 146 мм при плотности промывочной жидкости (ПЖ) 1,46 г/см³.

Погрешность определения $k_{\text{пп}}$ в повторном замере заметно меньше значений, которые предъявляются технической инструкцией к оценке пористости методами НК [3]. Значение погрешности определения $k_{\text{пп}}$ (приведенное к одному метру записи) на участках неразмытого ствола скважины не превышает $\pm 0,5\%$ абсолют. Это дает возможность эксплуатировать аппаратуру АИМС-90 в режиме измерения пористости со скоростью каротажа до 500–600 м/ч.

Погрешность определения сечения поглощения по повторному замеру (приведенная к одному метру записи) по данным зондов ИННК-Т_{МЗ} и ИНГК в диапазоне измерений от 4 до 30 с.и. не превысила 2,5% отн. Следует также указать, что сечения захвата нейтронов по данным двух разнотипных зондов после введения диффузационной поправки, хорошо повторяют друг друга (рис. 4, 5).

Погрешность оценки относительных содержаний элементов в породе по повторному замеру варьируется от 1 до 5% в зависимости от породообразующего элемента. Погрешность оценки содержаний алюминия, магния и углерода, определяемых по спектру ГИНР, в целом выше погрешности оценки содержания элементов, определяемых по спектру ГИРЗ. Ввиду отсутствия необходимого парка натурных моделей, массовых содержаний элементов, оценки абсолютных погрешностей их определения, кроме кальция, кремния и хлора, выполнены только на уровне моделирования методом Монте-Карло. Погрешность оценки массовых содержаний элементов при статистической погрешности измерений в одно стандартное отклонение, что соответствует оценке параметров пласта мощностью 1 м при скорости каротажа 200–250 м/ч, приведена в табл. 2.

Таблица 2
Статистическая погрешность определения
содержаний элементов

Элемент	Si	Ca	Fe	S	Cl	Na	Al	Mg
Статистическая погрешность, масс. %	2,0	2,1	0,6	1,3	0,06	2,5	3,0	3,0

На рис. 6 приведен пример восстановления минерального состава скелета породы (в рамках глинистой кварцево-полевошпатовой модели) по результатам оценки массовых содержаний элементов аппаратурой АИМС-90 в открытом стволе. На рис. 7 приведен пример решения задачи оценки насыщения коллекторов по результатам каротажа аппаратурой АИМС-90 в закрытом стволе. Задача решалась без привлечения данных открытого ствола по традиционной методике приращения кривой отношения С/О (мнемоника COR) и по результатам оценки массового содержания элементов в породе (в том числе и углерода). Результаты оценки насыщения по данным двух методик хорошо согласуются.

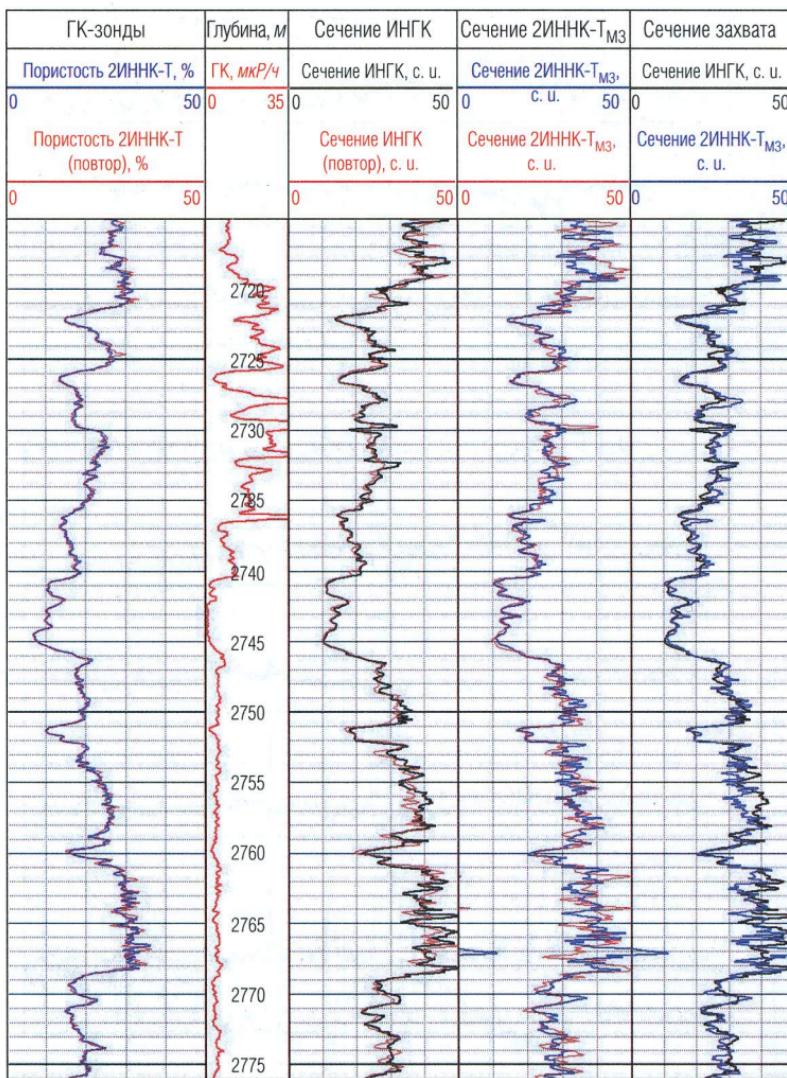


Рис. 4. Сопоставление основного и повторного замеров пористости и сечения захвата аппаратурой АИМС-90 в режиме литосканера

Обработка данных каротажа, выполненного с помощью аппаратуры АИМС-90, и решение задач в приведенных выше примерах сделаны в программном комплексе LogPWin.AIMS.

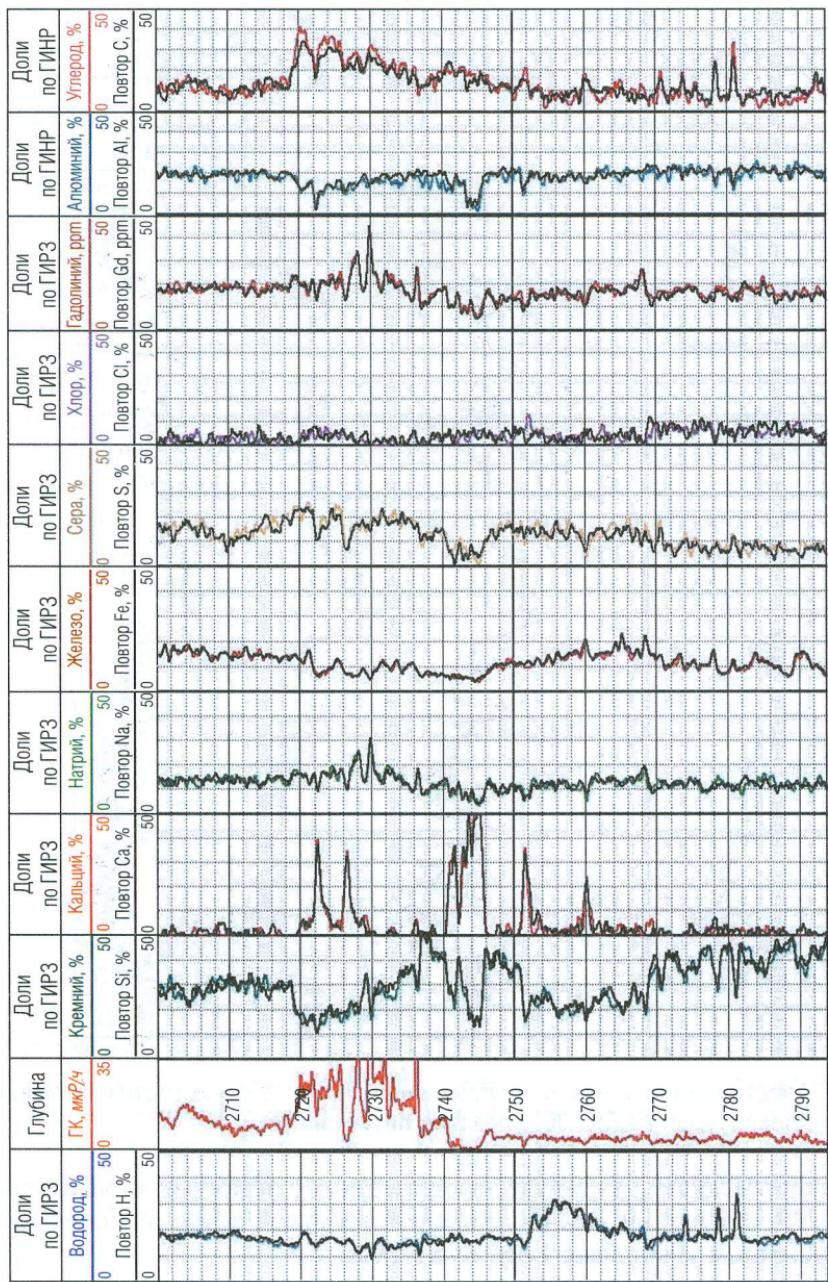


Рис. 5. Сопоставление результатов основного и повторного замеров определения относительных массовых содержаний элементов, полученных с помостью аппарата АИМС-90 в режиме литосканера

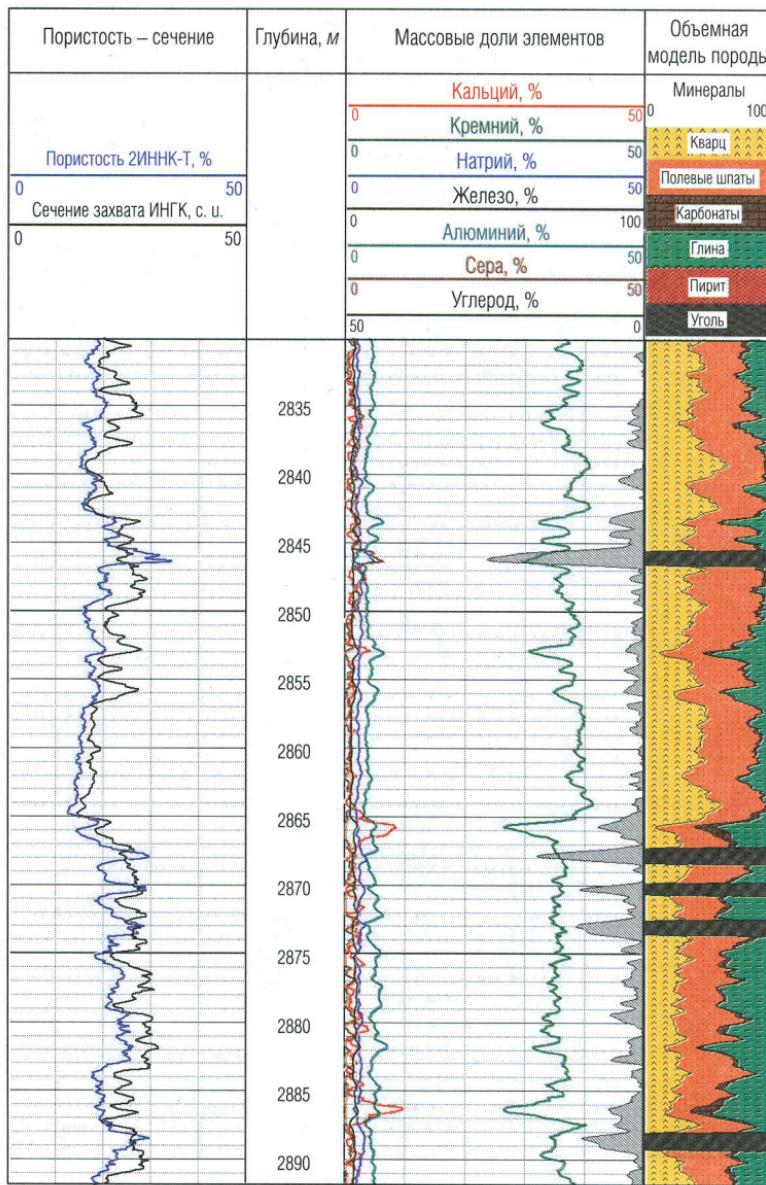


Рис. 6. Пример восстановления минеральной модели скелета породы по результатам определения массового содержания элементов

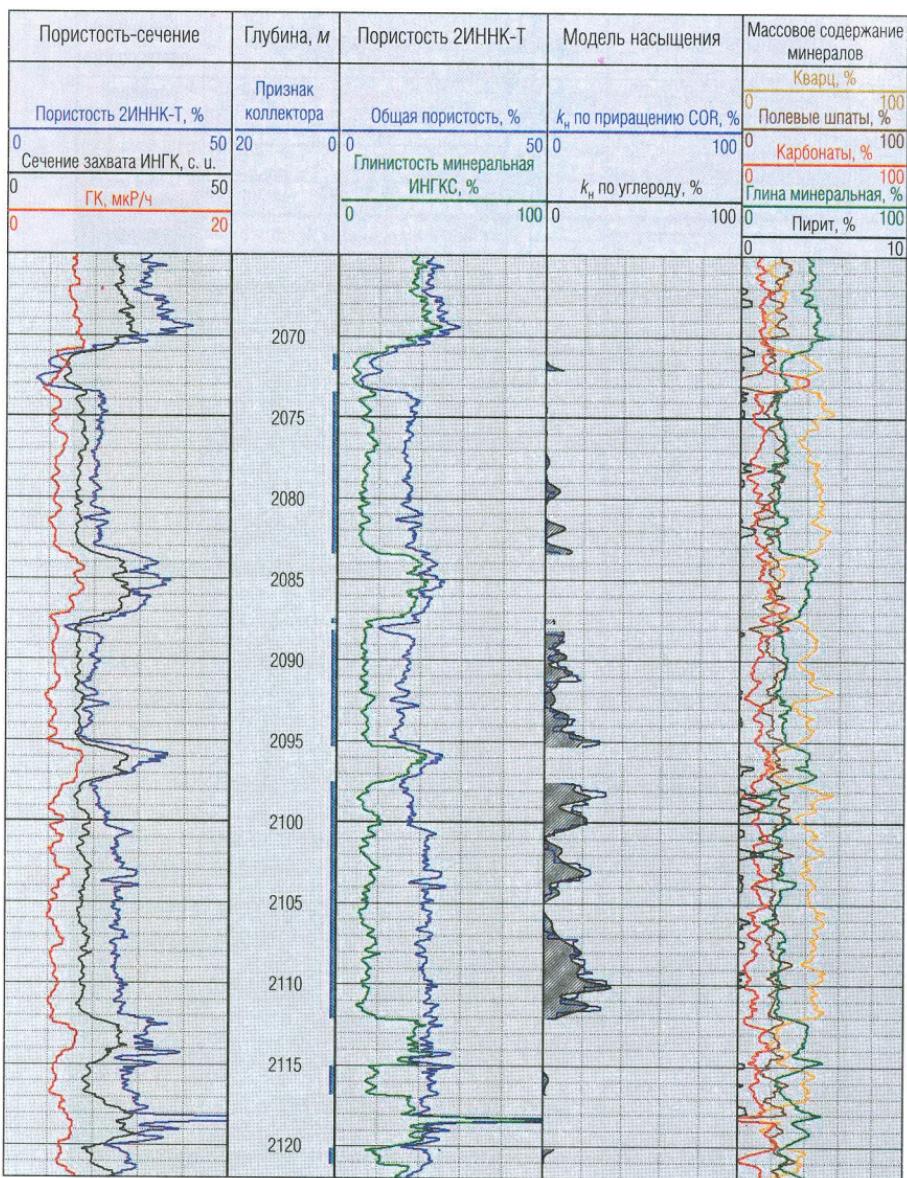


Рис. 7. Пример решения задачи оценки насыщения коллекторов по результатам каротажа аппаратурой АИМС-90 в закрытом стволе

ЛИТЕРАТУРА

1. Велижсанин В. А. Состояние интерпретационно-методического обеспечения аппаратуры компенсированного нейтронного каротажа // Геофизика. 2002. № 5. С. 42–47.
2. Велижсанин В. А., Беляков В. А., Волнухина А. А. и др. Аппаратура импульсного нейтронного каротажа АИНК-76П // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2016. Вып. 9 (267). С. 119–127.
3. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. М., 2001. 271 с.
4. Шимелевич Ю. С., Кантор С. А., Школьников А. С. и др. Физические основы импульсных нейтронных методов исследования скважин. М.: Недра, 1976. 160 с.
5. Ellis D. V., Singer J. M. Well Logging for Earth Scientists. Published by Springer, 2008.