

УДК 531.746:550.832

И. В. Гринев, А. Б. Королев, В. Н. Ситников
ООО «Нефтегазгеофизика»

КОМПОНОВКА СБОРКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНКЛИНОМЕТРА

Выделены и проанализированы основные источники погрешностей инклинометрии, которые могут быть минимизированы средствами компоновки. На основе проведенного анализа предложены конкретные рекомендации по компоновке геофизических приборов.

Ключевые слова: инклинометр, измерения, источники погрешности, компоновка, сборка.

Введение

Скважинный инклинометр редко используется вне сборки геофизических приборов. В то же время многочисленные замеры в скважинах показывают, что состав и компоновка сборки существенно влияют на результаты инклинометрических измерений. Геофизические приборы, как правило, содержат ферромагнитные материалы, которые в силу остаточной намагниченности могут оказывать влияние на магнитометрические элементы инклинометров. С другой стороны, в сборках нередко используются рычажные, центрируемые и прижимные приборы, что в свою очередь повышает вероятность появления технологических погрешностей (погрешностей установки). Кроме этого, в случае кабельных сборок нередко наблюдаются интенсивные вращения, которые отрицательно влияют на точность инклинометрических данных.

Таким образом, состав сборки и ее компоновка могут существенно влиять на величину погрешностей инклинометрических измерений. Однако, как показывает практика, данные погрешности в ряде случаев можно минимизировать или компенсировать, если в процессе проектирования и реализации компоновки учесть рассматриваемые в данной статье рекомендации.

Анализ каротажных данных. Рекомендации по компоновке геофизических сборок, включающих инклинометр

Изучение предмета статьи проводилось на основе большого количества каротажных данных, полученных на следующих месторождениях Западной Сибири: Южно-Выинтойское, Тевлинско-Русскинское, Повховское, Кустовое, Имилорское, Чумпасское, Южно-Харампурское, Карабашское, Кочевское, Покачевское, Свободное и Средне-Назымское.

В процессе анализа было выявлено три основных фактора, зависящих от состава и компоновки сборки, которые влияют на погрешности инклинометрии:

- 1) поле остаточной намагниченности (ПОН) приборов и бурильной колонны;
- 2) центрируемые, рычажные и прижимные приборы;
- 3) вращение сборки.

Перед тем как более подробно рассматривать приведенные выше источники погрешностей, стоит обосновать длину охрannого кожуха инклинометра. Экспериментально доказано, что геофизические приборы начинают существенно влиять на показания магнитометров с расстояний, меньших 2,2 м. В связи с этим магнитометры обычно располагаются в нижней части охрannого кожуха, длина которого обеспечивает необходимое удаление от приборов, содержащих ферромагнитные материалы. Такой случай соответствует «концевому» использованию инклинометра. При транзитном использовании необходимо обеспечить удаление магнитометров на 2,2 м от ближайших приборов с ПОН, располагающихся ниже инклинометра.

Погрешность, связанная с ПОН, заключается в том, что магнитометры инклинометра измеряют параметры не геомагнитного поля Земли (ГМП), а суперпозиции полей ГМП и ПОН. Очевидно, что компоновка должна проводиться таким образом, чтобы минимизировать вклад ПОН в измеряемую суперпозицию. Влияние ПОН на показания инклинометра достаточно подробно рассмотрены в [1, 2]. Стоит отметить, что длинные сборки приборов (40 м и более) также обладают ПОН, что вкупе с полем колонны приводит к величинам ПОН в области расположения магнитометров около 1% от ГМП. Напомним, что даже столь незначительное на первый взгляд влияние

способно привести к существенным погрешностям измерения азимута в том случае, если участок скважины располагается в пораженной области (зенитный угол больше 45° , ориентация приблизительно на магнитные запад или восток) [1].

Использование центрируемых, рычажных и прижимных приборов может привести к дополнительным технологическим погрешностям, которые выражаются в неточности позиционирования инклинометра в скважине (неколлинеарности осей инклинометра и ствола скважины). Теоретические аспекты данной проблемы рассмотрены в работе [3].

Вращения сборки геофизических приборов встречаются практически исключительно в случае каротажа на кабеле. Данная проблема складывается из влияния центробежных сил на показания акселерометров, а также разброса в пространстве (по визирному углу) данных, относящихся к одному кадру.

В процессе анализа был выявлен перечень основных средств, которые можно использовать в рамках исследуемой темы:

1) немагнитные вставки или немагнитные и/или слабомагнитные приборы в качестве «немагнитных вставок» (увеличения расстояния до бурильной колонны), а также в качестве средств удлинения базы инклинометра;

2) отклонители или центраторы в качестве средств минимизации разности диаметров прибора и скважины, а также диаметра инклинометра и соседних приборов по сборке;

3) гибкие соединительные устройства (СУ) для устранения моментов сил, способных привести к погрешностям установки;

4) головка свободного вращения (ГСВ) как средство снижения интенсивности вращений на кабеле.

В связи с тем что показания инклинометра соответствуют ориентации в пространстве корпуса инклинометра либо (в случае инклинометра в составе сборки геофизических приборов) жесткой части этой сборки, необходимо дать общие рекомендации по длине и центрированию жесткой части сборки:

– ограничение ее длины только длиной инклинометра приводит к высокой чувствительности к кавернам, частицам породы на стенках скважины, а также незначительным изменениям в кривизне оси ствола скважины [3]. Данная рекомендация неактуальна в случае обсаженной скважины;

– использование отклонителей или центраторов; отклонители целесообразно выбирать максимального диаметра, который не создаст помех при каротаже;

– установка в начале жесткой сцепки, включающей инклинометр, СУ для минимизации моментов сил, способных привести к установочным погрешностям и изгибам жесткой сцепки.

После общих рекомендаций можно перейти к конкретным рекомендациям по приведенным выше источникам погрешностей.

Поле остаточной намагниченности (ПОН) приборов и бурильной колонны. Идеальный случай расположения инклинометра – в конце сборки. В случае такого расположения необходимо проверить концевую заглушку, которая должна быть немагнитной. Выше инклинометра желательно располагать немагнитный или слабوماгнитный прибор. Стоит помнить: чем короче сборка, тем выше влияние ПОН бурильной колонны [1, 2].

Если ниже инклинометра устанавливается прибор, то его необходимо отделить немагнитной вставкой (или немагнитным прибором) длиной не менее 2,2 м.

Центрируемые, рычажные и прижимные приборы. В случае концевого расположения инклинометра без центраторов или отклонителей, если до него располагается центрируемый прибор, необходимо разделить их СУ. Это позволит инклинометру располагаться на стенке скважины параллельно оси ствола скважины. В противном случае будет наблюдаться занижение зенитного угла. Другой способ решения проблемы – установка на инклинометр центраторов или отклонителей, которые минимизируют неколлинеарность осей инклинометра и располагающегося выше прибора.

В том случае, если требуется расположить инклинометр не в конце сборки, следует располагать его между приборами, имеющими центраторы (либо отклонители одинакового диаметра). Данная мера позволяет исключить систематическую установочную погрешность (занижение зенитного угла).

Если инклинометр располагается между центрируемым и нецентрируемым приборами, необходимо ставить СУ между центрируемым прибором и инклинометром, либо, если это возможно, установить центраторы на инклинометр и на нецентрируемый прибор.

Особо стоит отметить использование в подобных сборках приборов с прижатым расположением в скважине. Данные приборы желательно заключать в СУ, так как они в случае вращения способны привести к наибольшей установочной погрешности не только инклинометра, но и других приборов в сборке. Особенно это актуально в случае больших диаметров скважин.

Вращение сборки. В случае использования в сборке центрируемых, рычажных и прижимных приборов целесообразно использовать в верхней части сборки ГСВ, так как она позволит существенно снизить интенсивность вращений. В случае сборки гладких приборов ГСВ обычно не приводит к существенному снижению интенсивности вращений.

Выводы

Исходя из состава и требований, предъявляемых к другим приборам сборки, следует постараться выполнять следующие рекомендации по компоновке, приводящие к минимизации погрешностей инклинометра:

1. Концевое положение инклинометра. Проверить немагнитность концевой заглушки.
2. Обеспечить достаточное удаление инклинометра от приборов с большим ПОН, а также (в случае автономной аппаратуры) от буровых труб.
3. Если прибор устанавливается ниже инклинометра, то его необходимо отделить немагнитной вставкой (или немагнитным прибором) длиной не менее 2,2 м.
4. Следует увеличить базу инклинометра путем жесткой сцепки с соседними приборами. Установка в начале жесткой сцепки СУ.
5. По возможности оборудовать жесткую часть сборки центраторами или отклонителями максимального диаметра, которые не создадут сопротивления при каротаже.
6. Согласовать диаметры инклинометра и соседних приборов. Установка на инклинометр отклонителей или центраторов в том случае, если по соседству располагаются приборы с отклонителями или рычажные приборы. Заключение в СУ прижимных приборов.

7. В случае кабельной сборки желательно принятие мер для уменьшения интенсивности вращений – установка ГСВ. Данная рекомендация неактуальна в случае гладких сборок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гринец И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н.* Влияние остаточной намагниченности бурильной колонны и сборки геофизических приборов на показания инклинометра // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2019. Вып. 4 (298). С. 87–95.
2. *Гринец И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н.* Компенсация влияния поля остаточной намагниченности бурильной колонны и сборки геофизических приборов на показания инклинометра // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2020. Вып. 1 (301). С. 104–111.
3. *Козыряцкий Н. Г.* Источники погрешностей инклинометрических исследований скважин // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып. 3. С. 215–234.

Рецензент доктор техн. наук, проф. Г. В. Миловзоров

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 столбом.

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

$$A = [(N_{\text{МЗ}}(k_{\text{п}})/N_{\text{БЗ}}(k_{\text{п}})]/[(N_{\text{МЗ}}(k_{\text{п}} = 100)/N_{\text{БЗ}}(k_{\text{п}} = 100))],$$

где $N_{\text{МЗ}}(k_{\text{п}})$, $N_{\text{БЗ}}(k_{\text{п}})$ – показания (скорость счета в *имп/мин*) малого (МЗ) и большого (БЗ) зондов соответственно в пласте с пористостью $k_{\text{п}}$.

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 аппаратуры АИМС-90 от пористости породы в открытом стволе, которая описывает связь между пористостью известняка, представленного чистым кальцитом, и показаниями аппаратуры А в стандартных условиях измерений [1].

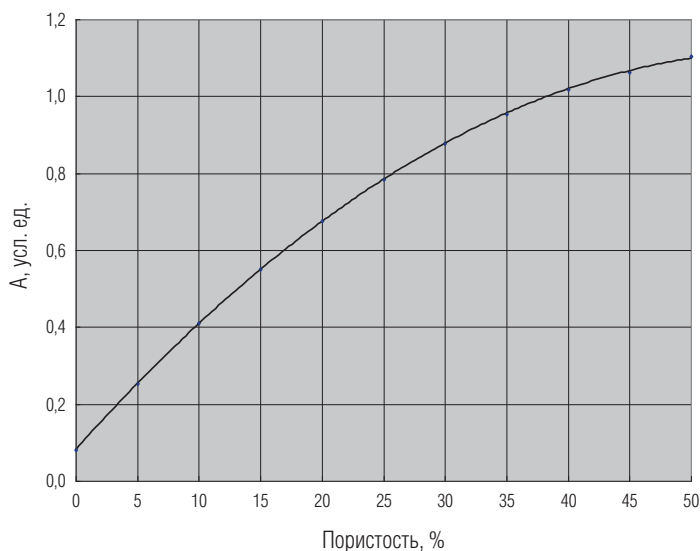


Рис. 1. Основная зависимость зонда 2ИННК-Т (открытый ствол)

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 диапазон измерения пористости, % основная относительная погрешность измерений, % диапазон измерения сечения захвата, с.и. основная относительная погрешность измерений, %	гелиевый, типа СНК 0–40 $\pm[4,2 + 2,3(40/k_n - 1)]$ 4–40 $\pm 2,5$
Канал ИНГК-С измерения массовых содержаний элементов и сечения захвата: тип детектора определяемые породообразующие элементы диапазон измерений сечения захвата, с.и. основная относительная погрешность измерений, %	BGO Ca, Si, Fe, Na, Cl, S, O, C, Mg, Ti, Al, Gd и др. 4–40 $\pm 2,5$
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 режим измерения пористости режим литосканера	30–35 400–600 200–400
Время установления рабочего режима, мин, не более	10
Активность источника излучения, н/с, не более	14,1 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.

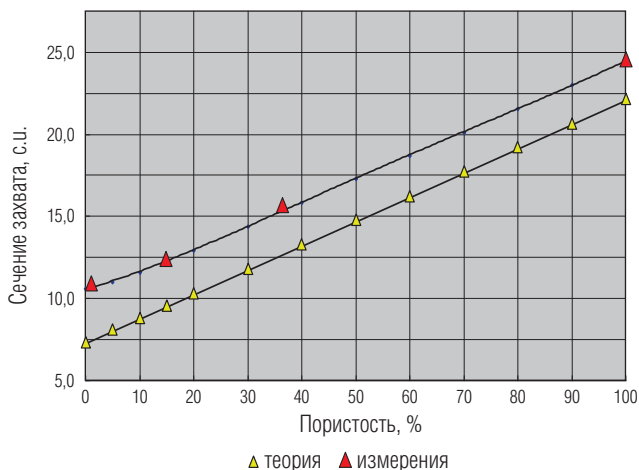


Рис. 2. Основная зависимость сечения захвата от пористости для ее оценки с помощью зонда ИННК-Т_{мз} (открытый ствол)

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) $S_{\text{ГИРЗ}}(E_\gamma)$ нейтронов 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:

$$\begin{aligned} S_{\text{ГИРЗ}}(E_\gamma) &= \Phi_{\text{т}} \times \sum S_{i, \text{ГИРЗ}}(E_\gamma) \times \sigma_{a, i}, \\ S_{\text{ГИНР}}(E_\gamma) &= \sum \langle \sigma_{in, i} \rangle \times S_{i, \text{ГИНР}}(E_\gamma), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Phi_{\text{т}}$ – поток тепловых нейтронов; $\sigma_{a, i}$ – сечение захвата на i -м элементе породы; $\langle \sigma_{in, i} \rangle = \int \sigma_{in, i}(E) \times \Phi_{\text{нт}}(E) dE$ – усредненное сечение неупругого рассеяния на i -м элементе; $\Phi_{\text{нт}}$ – 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.

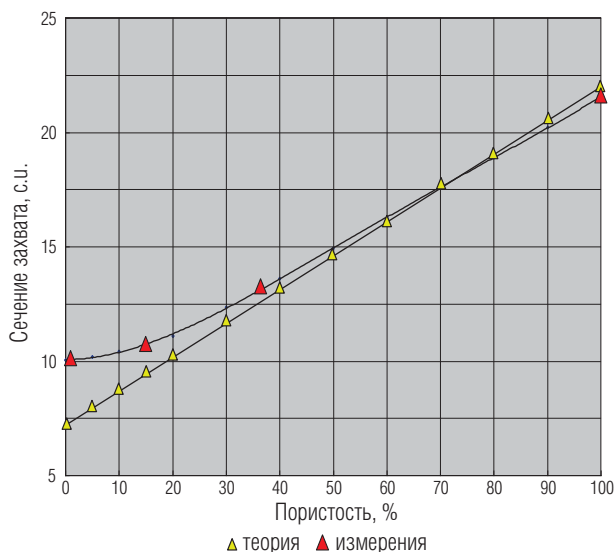


Рис. 3. Основная зависимость сечения захвата от пористости зонда ИНГК-С для ее оценки с помощью зонда ИНГК-С (открытый ствол)

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 захвата нейтронов по данным ИННК-Т_{мз} 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 $k_{\text{п}}$ в повторном замере заметно меньше значений, которые предъявляются технической инструкцией к оценке пористости методами НК [3]. Значение погрешности определения $k_{\text{п}}$ (приведенное к одному метру записи) на участках неразмытого ствола скважины не превышает $\pm 0,5\%$ абс. 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 диффузионной 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 порообразующего 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 натуральных 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.

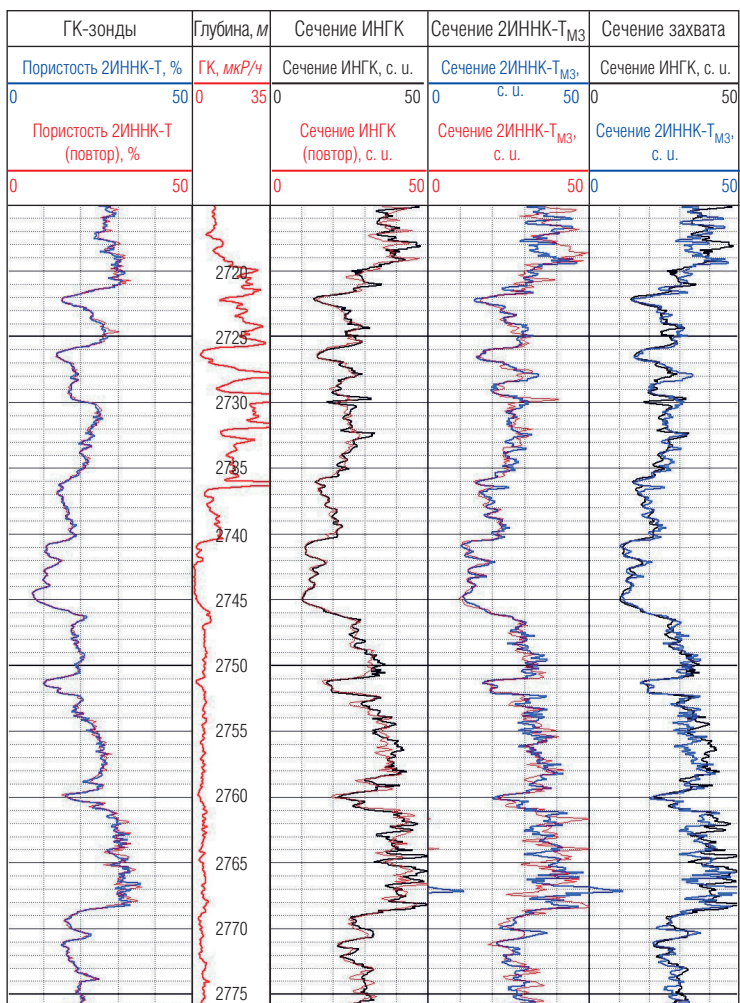


Рис. 4. Сопоставление основного и повторного замеров пористости и сечения захвата аппаратурой АИМС-90 в режиме литосканера

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

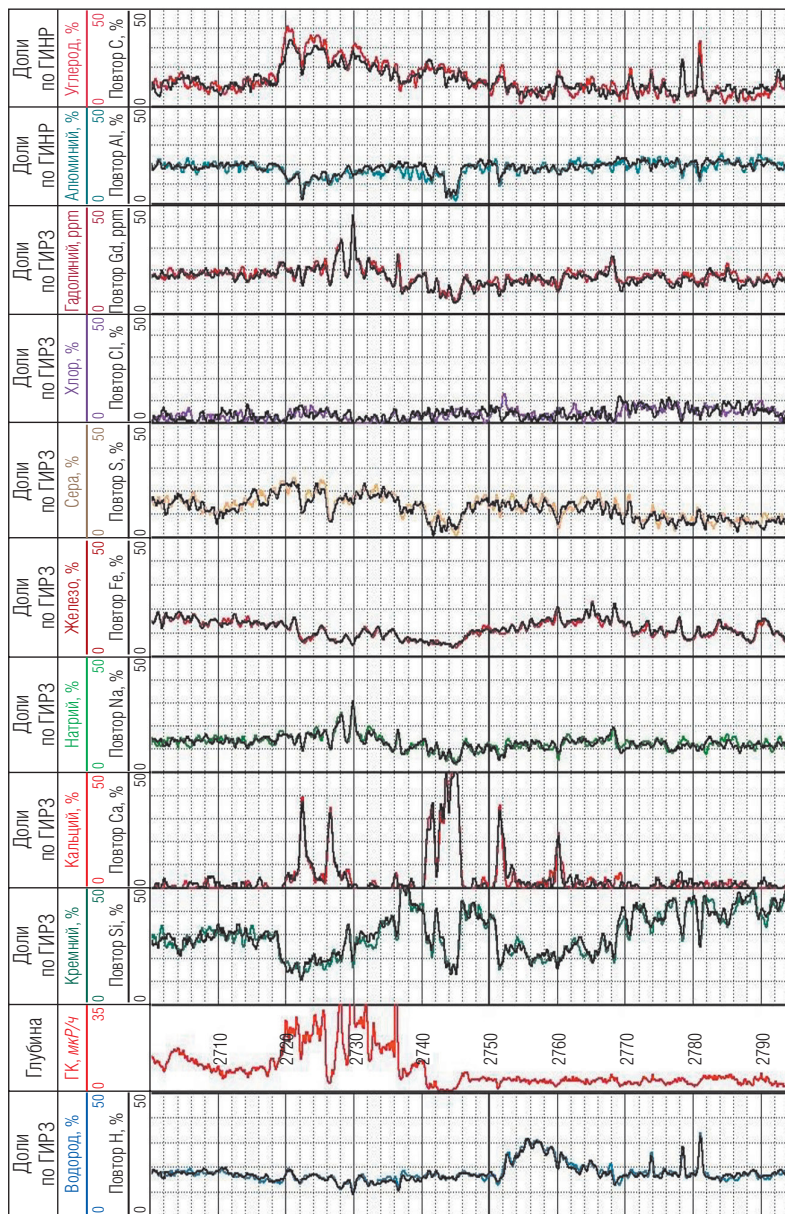


Рис. 5. Сопоставление результатов основного и повторного замеров определения относительных массовых содержаний элементов, полученных с помощью аппаратуры АИМС-90 в режиме литосканера

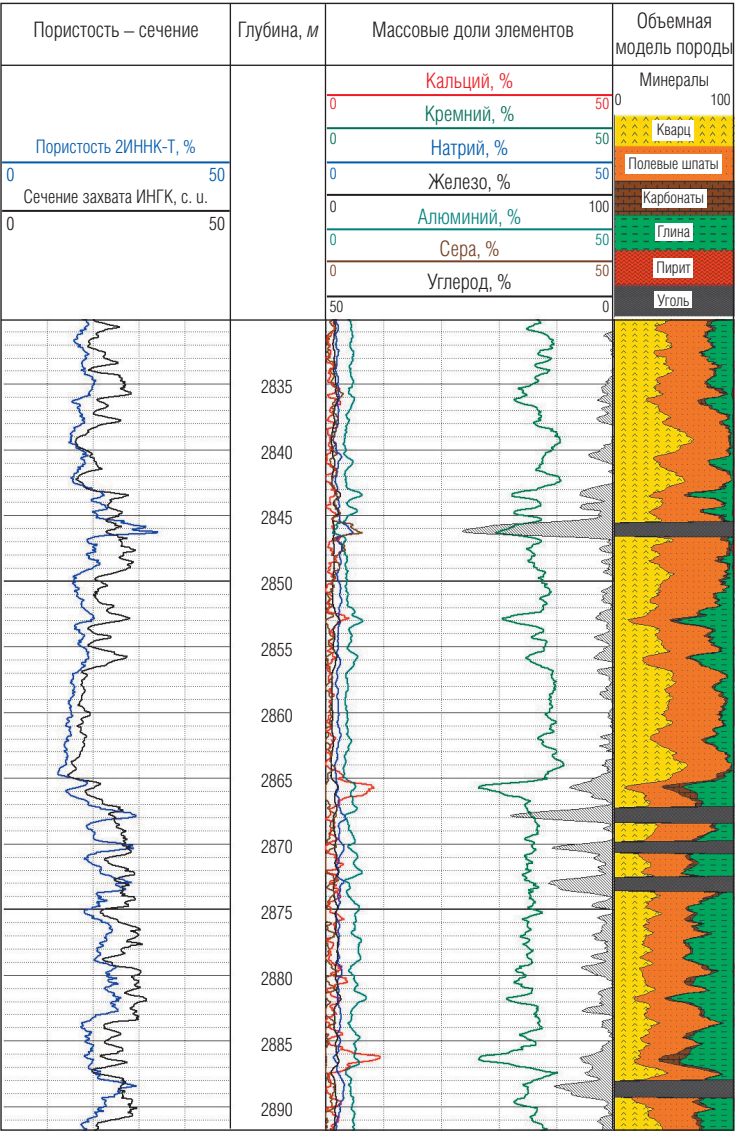


Рис. 6. Пример восстановления минеральной модели скелета породы по результатам определения массового содержания элементов

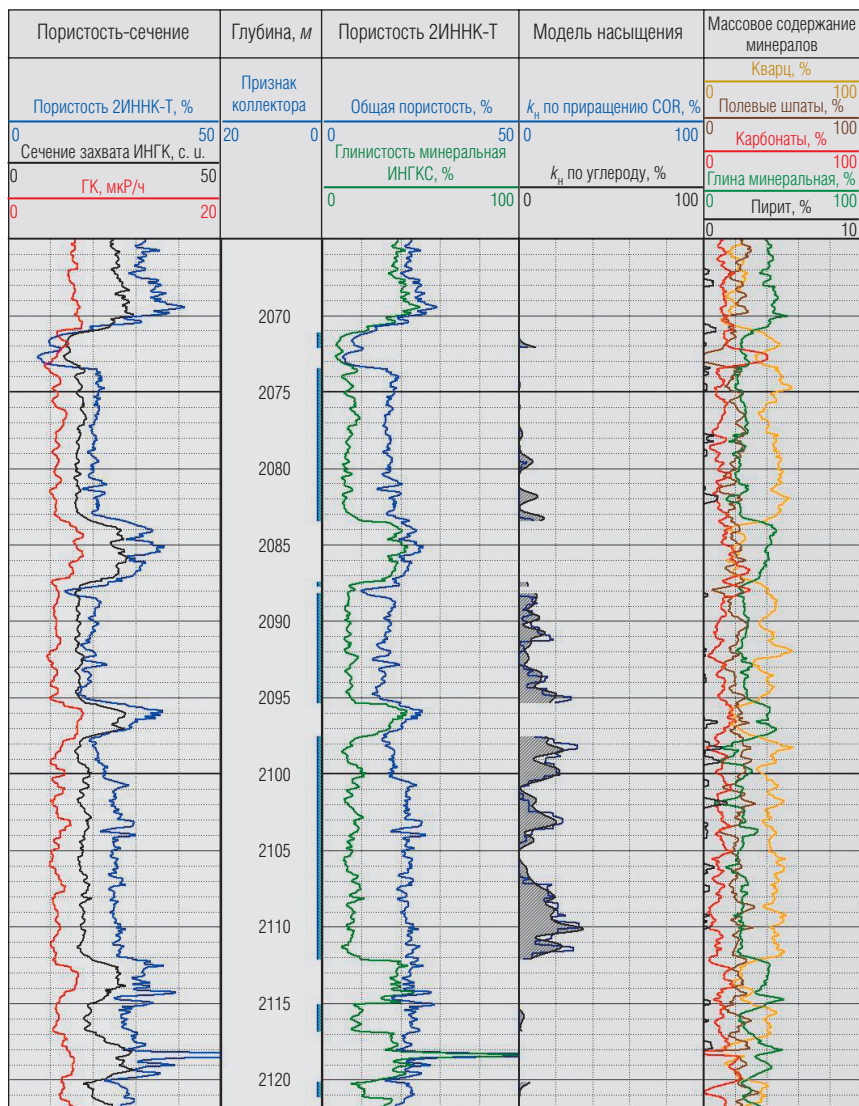


Рис. 7. Пример решения задачи оценки насыщения коллекторов по результатам каротажа аппаратурой АИМС-90 в закрытом стволе

ЛИТЕРАТУРА

1. Велижанин В. А. Состояние интерпретационно-методического обеспечения аппаратуры компенсированного нейтронного каротажа // Геофизика. 2002. № 5. С. 42–47.
2. Велижанин 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.