

УДК 550.832.55

*А. А. Бубеев, В. А. Велижанин, Н. Г. Лобода**ООО "Нефтегазгеофизика"**А. Г. Тихонов**Трест "Сургутнефтегеофизика"*

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ И СКВАЖИННЫХ ИСПЫТАНИЙ ОЦЕНКИ МАССОВЫХ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ДАННЫМ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО НЕЙТРОННОГО ГАММА-КАРОТАЖА

Представлены результаты опробования методики оценки массовых содержаний элементов по данным модельных и скважинных измерений с помощью аппаратуры спектрометрического нейтронного гамма-каротажа в условиях терригенных отложений Западной Сибири.

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

Аппаратура спектрометрического нейтронного гамма-каротажа (СНГК) предназначена для оценки массовых содержаний ряда химических элементов в породах. Этот список включает в себя Si, Ca, Fe, S, Ti, Gd, Cl, H и может быть расширен некоторыми другими элементами. Результаты определения массовых содержаний элементов используются для корреляции данных по скважинам при разведке и разработке месторождений, количественной оценки литологии при моделировании физических свойств пород, получения уточненных данных о пористости и в некоторых других приложениях. Целью настоящей работы было продолжение исследований по разработке, опробованию либо уточнению методики обработки данных СНГК [1], оценка качества и доработка интерпретационного обеспечения метода, оценка либо уточнение точностных характеристик определения массовых содержаний элементов по данным реальных измерений аппаратурой СНГК.

В [1] на результатах математического моделирования рассматривались некоторые аспекты методики обработки данных СНГК. Суть методики состоит в предварительном выделении пластовой составляющей регистрируемого гамма-излучения по показаниям нейтронного зонда по тепловым нейтронам с дальнейшим разло-

жением полученного спектра на спектры отдельных элементов. Для этого была создана библиотека расчетных спектров элементов. Существуют два альтернативных способа формирования набора стандартных спектров: физическое (натурное) моделирование и математическое моделирование показаний аппаратуры СНГК методом Монте-Карло. Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки.

При натурном моделировании физическая модель, используемая для получения стандартного спектра, в идеале должна состоять из одного элемента и в то же время обеспечивать присущие типовой породе свойства переноса нейтронов и гамма-квантов. На практике этого достичь практически невозможно. Кроме того, спектры, полученные из реальных замеров, должны быть очищены от излучения прибора и ствола скважины. Последняя задача без привлечения аппарата математического моделирования не всегда возможна. При интерпретации данных СНГК необходимо также обеспечить равенство энергетического разрешения исследуемых спектров с разрешением стандартных спектров. Это возможно при наличии математического аппарата, позволяющего приводить энергетическое разрешение модельных спектров к разрешению текущего зарегистрированного спектра. В случае реальных аппаратурных спектров можно только поднять величину разрешения, поскольку обратная задача является весьма трудоемкой.

При математическом моделировании получаем физические спектры отдельных элементов. Их преимуществом является более простой способ наложения разрешения. К тому же, в отличие от реально зарегистрированных аппаратурных спектров, при математическом моделировании существует возможность раздельного формирования спектров пласта, скважины и прибора.

Несмотря на хорошее совпадение расчетных и измеренных спектров [1] для обработки реальных измерений с помощью аппаратуры СНГК в качестве стандартных спектров элементов и прибора было решено использовать спектры, измеренные на натурных моделях, и только те спектры, которые невозможно получить путем измерений, моделировались методом Монте-Карло. Математическим моделированием были получены спектры водорода, натрия, титана и гадолиния. Спектры кальция, кремния, серы, хлора, железа и “прибора” были получены измерениями на натурных моделях с

приведением к единым стандартным условиям измерений по данным расчетов методом Монте-Карло. Заметим, что в “спектр прибора”, кроме спектра гамма-излучения радиационного захвата нейтронов в материале прибора, включены спектры гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов и гамма-излучения от источника нейтронов. Последние две составляющие “спектра прибора” практически не зависят от условий измерений и по амплитуде определяются только мощностью источника нейтронов.

Первые измерения прибором СНГК проводились на моделях в Твери и Раменском. Результаты этих замеров использовались как для формирования библиотеки модельных спектров, так и для проверки методики обработки. Так, измерения в баке с водой позволили выделить стандартный спектр прибора путем очистки зарегистрированного спектра от водородного излучения. Спектр железа был получен путем размещения колонны в баке с водой и последующей очистки спектра от излучения водорода и “прибора”. Аналогичным способом были сформированы и спектры других элементов (Ca, Si, S, Cl). Спектр кремния был получен на модели водонасыщенного песчаника, кальция на мраморной модели и т. д. Для облегчения дальнейшей методической работы амплитуды спектров всех элементов были приведены в соответствии с расчетными данными.

Обработка модельных измерений оценивалась с точки зрения корректности получаемого элементного состава моделей и формирования скважинной составляющей по показаниям нейтронного зонда.

Массовые содержания элементов, полученные при обработке данных СНГК, сведены в табл. 1. В столбце “Ожидаемые массовые содержания” указаны массовые содержания элементов, рассчитанные на основе плотности, пористости и состава моделей. Хотя состав моделей из стеклянных шариков точно неизвестен, мы не исключили их из рассмотрения, поскольку эти модели представляют интерес в плане содержания хлора и натрия.

Анализ модельных замеров позволил уточнить спектральные чувствительности аппаратуры для элементов и основную зависимость скважинной составляющей от показаний нейтронного зонда, полученных ранее по данным математического моделирования.

Массовые содержания, полученные по замерам в моделях 1–4, хорошо согласуются с реальными значениями. Погрешность определения водорода в этих моделях не превышает 0,15%, что позволяет

говорить о корректном формировании скважинной составляющей. В состав модели 2 одновременно входят кальций, кремний и водород. Массовые содержания кремния и кальция в этой модели были определены с точностью до 0,2%, погрешность определения водорода при этом составила менее 0,1%.

Таблица 1

Результаты определения массовых содержаний элементов
(Раменские модели)

Но- мер мо- дели	Модель	Диа- метр, мм	Характер насыще- ния	Матери- ал об- садной колонны	Эле- мент	Массовые содер- жания, %	
						ожидае- мые	опреде- ляемые
1	Известняк $k_n = 0,8\%$	196	Вода	–	Ca	39,88	39,84
					H	0,03	0,02
2	Известняк, песчаник $k_n = 14,9\%$	196	Вода	Сталь	Ca	28,21	28,13
					Si	10,89	11,02
					H	0,68	0,67
3	Известняк $k_n = 36,4\%$	196	Вода	Сталь	Ca	33,0	32,74
					H	1,94	2,02
4	Песчаник $k_n = 37\%$	196	Вода	Пластик	Si	38,11	38,42
					H	2,04	1,94
5	Стеклян- ные ша- рики	196	Вода	Сталь	Ca	–	9,80
					Si	–	26,64
					H	–	1,96
6	Стеклян- ные ша- рики	196	Диз. топливо	Сталь	Ca	–	10,76
					Si	–	24,80
					H	–	2,11
7	Стеклян- ные ша- рики	196	Вода мин. 100 г/л	Сталь	Ca	–	12,26
					Si	–	24,05
					H	–	1,68
					Cl	–	0,96

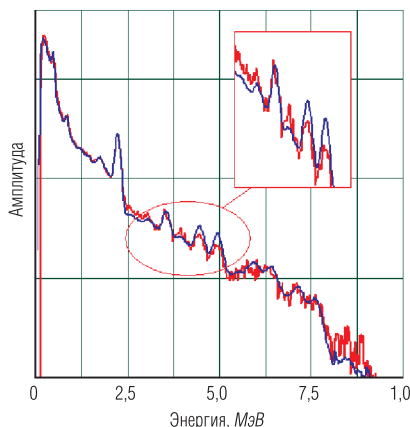
Модели 5–7 выполнены из стеклянных шариков и заполнены пресной водой, дизельным топливом и минерализованной водой соответственно. Эти модели имеют более сложный, по сравнению с моделями 1–4, элементный состав. При интерпретации данных замеров в моделях 5–7 было замечено увеличение погрешности определения массовых содержаний. При этом спектр, восстановленный по результатам разложения, не воспроизводил с достаточной точностью зарегистрированный спектр (рис. 1, *а*). Предположительно это связано с неучтенным составом моделей. Стеклянные шарики, являющиеся основой моделей 5–7, содержат натрий. Изначально натрий не входил в перечень определяемых элементов, и его излучение перераспределялось между другими элементами разложения. Для проверки этого предположения спектр натрия был включен в разложение. Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ массовых содержаний элементов, полученных при разложении с учетом натрия и без него

Но- мер моде- ли	Модель	Элемент	Массовое содержание	
			Натрий участвует в разложении	Натрий не участвует в разложении
5	Стеклянные шарики, пре- сная вода	Ca	3,14	9,80
		Si	27,39	26,64
		H	2,48	1,96
		Na	3,08	–
6	Стеклянные шарики, со- лярка	Ca	2,62	10,76
		Si	29,42	24,80
		H	2,26	2,11
		Na	2,8	–
7	Стеклянные шарики, мин. вода 100 г/л	Ca	3,8	12,26
		Si	27,12	24,05
		H	1,93	1,68
		Cl	1,19	0,96
		Na	4,0	–

а



б

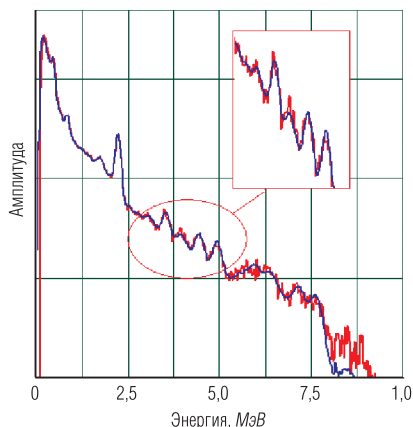


Рис. 1. Пример восстановления спектра по результатам разложения:
а – без участия спектра натрия; б – с участием спектра натрия

Действительно, при повторной обработке данных натрия определенлся как элемент, входящий в состав моделей, а спектр (рис. 1, б), полученный по результатам разложения, хорошо воспроизводил зарегистрированный спектр. Массовое содержание натрия в моделях с пресной водой и соляной водой составило порядка 3%. В модели 7 с минерализованной водой его содержание выше на 0,8–1%. Массовое содержание хлора в этой модели равно 1,15–1,25%. Эти значения вполне согласуются со значениями, рассчитанными на основании плотности, пористости и минерализации модели 7. Скелетные составляющие модели остаются постоянными: массовое содержание кальция 3–4%, кремния – 27–29%. Включение натрия в разложение значительно уменьшило массовое содержание кальция. Как и в случае со спектрами математического моделирования [1], при отсутствии натрия в разложении большая часть его излучения приходится на кальций. Этот эффект объясняется близостью энергетических линий натрия и кальция (6,395 и 6,419 МэВ соответственно) в спектре радиационного захвата тепловых нейтронов.

Точность определения кальция и натрия в моделях 5–7 оценить невозможно из-за отсутствия данных о точном составе этих моде-

лей. Добавление натрия в набор определяемых элементов не внесло дополнительной погрешности в определение массовых содержаний элементов в моделях 1–4, в состав которых не входил натрий.

Таким образом, результаты обработки данных модельных измерений и исследований, проведенных методом математического моделирования [1], позволили добавить натрий в список элементов, определяемых методом СНГК. Особый интерес эта возможность приобретает в отложениях с полевошпатовым составом.

Методика обработки данных СНГК также тестировалась на моделях треста “Сургутнефтегеофизика”. В табл. 3 приведены массовые содержания элементов, полученные при обработке модельных данных.

Из табл. 3 видно, что во всех моделях с пористостью менее 20% погрешность определения массового содержания водорода не превышает 0,3%. С увеличением пористости погрешность определения водорода возрастает в моделях с алюминиевой обсадкой, где ее величина может достигать 0,5%. В этих моделях происходит систематическое завышение водородосодержания. В моделях 8–9 со стальной обсадкой подобной ситуации не наблюдается. Причина данных расхождений в настоящее время однозначно не установлена. Необходимо провести дополнительные исследования, чтобы выяснить, чем обусловлена столь высокая погрешность определения водородосодержания: различием в конструкциях моделей, ошибками аттестации моделей или неточностью используемого палеточного обеспечения.

Все модели имеют двухкомпонентный состав (песчаник–флюид, известняк–флюид), поэтому погрешность определения кальция и кремния в большей степени зависит от корректности формирования скважинной составляющей. Погрешность определения кальция и кремния в моделях не превысила 2,5%.

Модели 8–10 насыщены минерализованной водой. Во всех моделях наблюдается хорошая сходимостъ массовых содержаний хлора, определяемых по замерам, со значениями массовых содержаний, рассчитанных на основании состава моделей. Погрешность определения хлора составила порядка 0,1–0,15%. В то же время погрешность определения кремния в этих моделях максимальна – 2,5% за счет ложного определения кальция с массовым содержанием до 2%.

Таблица 3

Результаты определения массовых содержаний элементов
(модели треста "Сургутнефтегеофизика")

Но- мер моде- ли	Модель	Диа- метр, мм	Характер насыще- ния	Материал обсадной колонны	Эле- мент	Массовые содержания, %	
						ожидае- мые	опреде- ляемые
1	Известняк $k_n = 0,8\%$	216	Вода	–	Ca	39,88	39,64
					H	0,03	0,1
2	Известняк $k_n = 15,6\%$	216	Вода	Алюминий	Ca	37,45	37,39
					H	0,71	0,72
3	Известняк $k_n = 33,8\%$	216	Вода	Алюминий	Ca	33,66	31,64
					H	1,76	2,31
4	Песчаник $k_n = 16,5\%$	216	Вода	Алюминий	Si	43,43	42,75
					H	0,77	0,93
5	Песчаник $k_n = 35,1\%$	216	Вода	Алюминий	Si	38,76	36,97
					H	1,88	2,30
6	Песчаник $k_n = 16,7\%$	216	Диз. топливо	Алюминий	Si	43,85	42,60
					H	0,86	0,96
7	Песчаник $k_n = 34,9\%$	216	Диз. топ- ливо	Алюминий	Si	39,82	36,84
					H	2,1	2,34
8	Песчаник $k_n = 16,5\%$	216	Вода мин. 150 г/л	Сталь	Si	43,7	42,02
					H	0,73	0,45
					Cl	0,62	0,67
9	Песчаник $k_n = 16,9\%$	216	Вода мин. 25 г/л	Сталь	Si	43,33	42,71
					H	0,79	0,72
					Cl	0,11	0,10
10	Песчаник $k_n = 35,0\%$	216	Вода мин. 25 г/л	Сталь	Si	38,71	36,30
					H	1,86	1,86
					Cl	0,25	0,24

Кроме модельных измерений, для тех же целей тестирования методики определения массовых содержаний элементов по данным СНГК на месторождениях Западной Сибири были выполнены замеры в двух скважинах с открытым и двух скважинах с обсаженным стволами. Химический анализ керна в исследуемых скважинах отсутствует. Анализ результатов обработки данных СНГК проводился по визуальному описанию керна, составленному непосредственно на скважине, и по совокупным данным, имеющимся по месторождению. Наибольшее внимание было уделено определению содержания в породе серы, титана, натрия и железа. Модельные установки для этих элементов отсутствуют и потому методические вопросы, связанные с их определением, в настоящее время могут исследоваться только на скважинном материале.

На рис. 2 приведены результаты исследования одной из скважин Восточно-Вычьяхского месторождения методом СНГК. По всему стволу скважины видна корреляция между кривыми водородосодержания и пористости по нейтрон-нейтронному каротажу. На участках с ровным стволом необсаженной скважины значительное увеличение массового содержания водорода соответствует углистым отложениям. Серым цветом выделены интервалы, в которых по описанию керна присутствуют угли. Пропластки углей отчетливо видны и в нижней части интервала исследований.

В состав породы входят полевые шпаты, поэтому в набор определяемых элементов был включен натрий. Полученные при обработке массовые содержания натрия в породе варьируют от 1,5 до 3,5%, что вполне соответствует данным, полученным по химическому анализу керна на данном месторождении.

Содержание железа по керну составляет от 2 до 6%. По данным СНГК это значение несколько выше – 2–9%, поскольку железо частично “содержит” излучения алюминия. Глины по данным СНГК характеризуются повышенным содержанием железа.

Корректность определения серы оценивалась путем сравнения данных СНГК с описанием керна по скважине (табл. 4). В интервалах 1, 3–6 при визуальном описании керна определяется наличие пирита. На рис. 2 эти интервалы выделены сиреневым цветом. При обработке данных СНГК в указанных интервалах определилась сера с массовым содержанием от 0,9 до 5%. Наличие пирита в пласте, как правило, сопровождается увеличением массового содержания

железа (пласт 1, 3, 4). В интервалах 2, 10 пирит в описании керна отсутствует. По данным СНГК массовое содержание серы в этих интервалах также мало и не превышает 0,25%. Наличие незначительного содержания серы может быть связано как с погрешностью метода, так и с отсутствием более точных данных по керну.

По описанию керна в интервале 3 присутствует кальцит. По данным СНГК также наблюдается увеличение массового содержания кальция до 5–10%. Пропластки с повышенным содержанием кальция характеризуются повышением сопротивления по боковому каротажу и понижением пористости по нейтронному каротажу. Подобная корреляция трех кривых прослеживается по всему стволу скважины (рис. 2).

Таблица 4

Сопоставление описания керна с данными обработки СНГК

Интервал	Описание керна	Определяемое содержание серы, %	Определяемое содержание железа, %
1	Аргиллит темно-серого цвета, хрупкий плитчатый с единичными прослоями алевролита светло-серого цвета. Наблюдаются остатки УРД и линзы пирита	1,09	6,72
2	Песчаник светло-серый, мелко-, средне- и тонкозернистый, средней крепости, твердый	0,0	4,86
3	Аргиллит темно-серого до бурого цвета битуминозного местами с выпотами УВ светло-зеленого цвета преимущественно внизу слоя. Также с конкрециями и прожилками пирита и кальцита	3,37	6,31
4	Аргиллит темно-серого до бурого цвета битуминозного с конкрециями и прожилками пирита с раковистым изломом	3,53	5,51
5	Аргиллит темно-серого до бурого цвета битуминозного с линзами и прожилками пирита с раковистым изломом средней крепости	1,05	2,77
6	Аргиллит темно-серый, битуминозный с переходом в бурый, нижней части слоя, с присутствием пирита. Имеется прослой 0,05 м серого цвета	1,19	4,49
10	Песчаник светло-серый, мелкозернистый, алевроитистый, плотный, однородный с одной прослойкой аргиллита 3 см	0,16	4,64

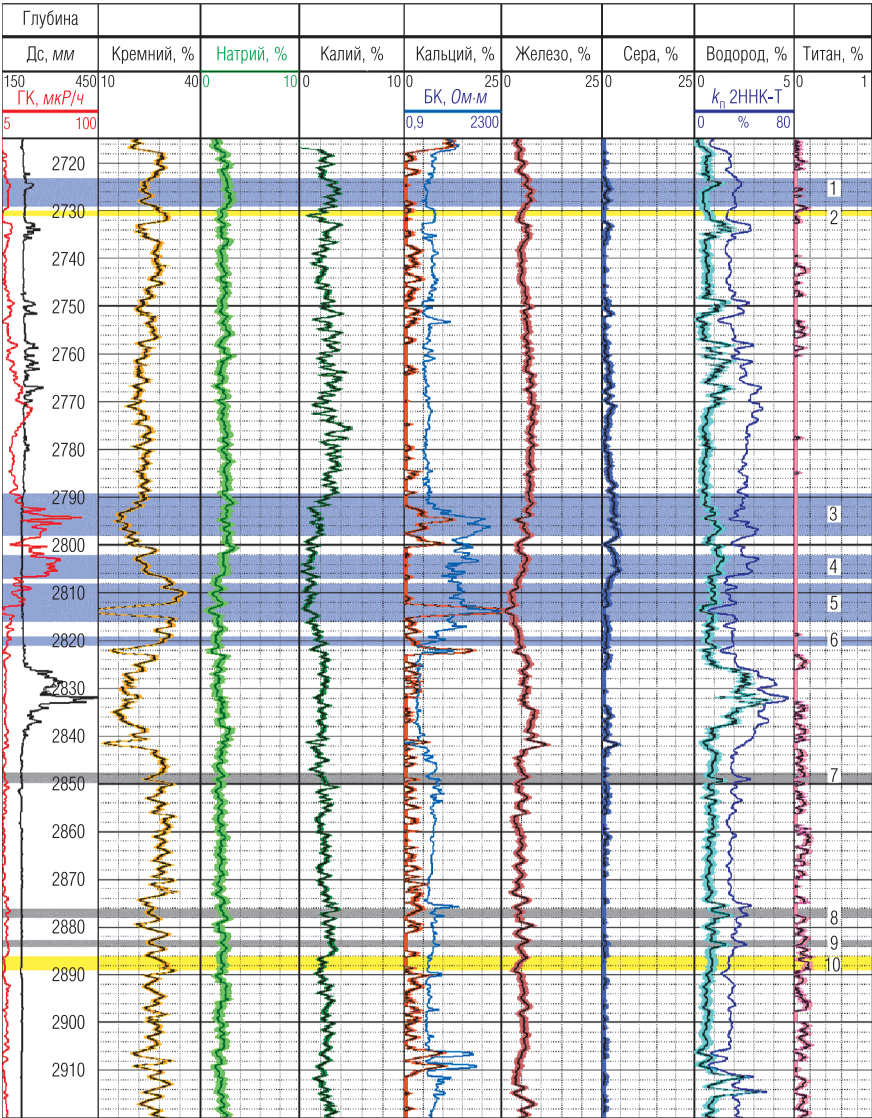


Рис. 2. Пример расчета массовых содержаний по результатам каротажа в открытом стволе

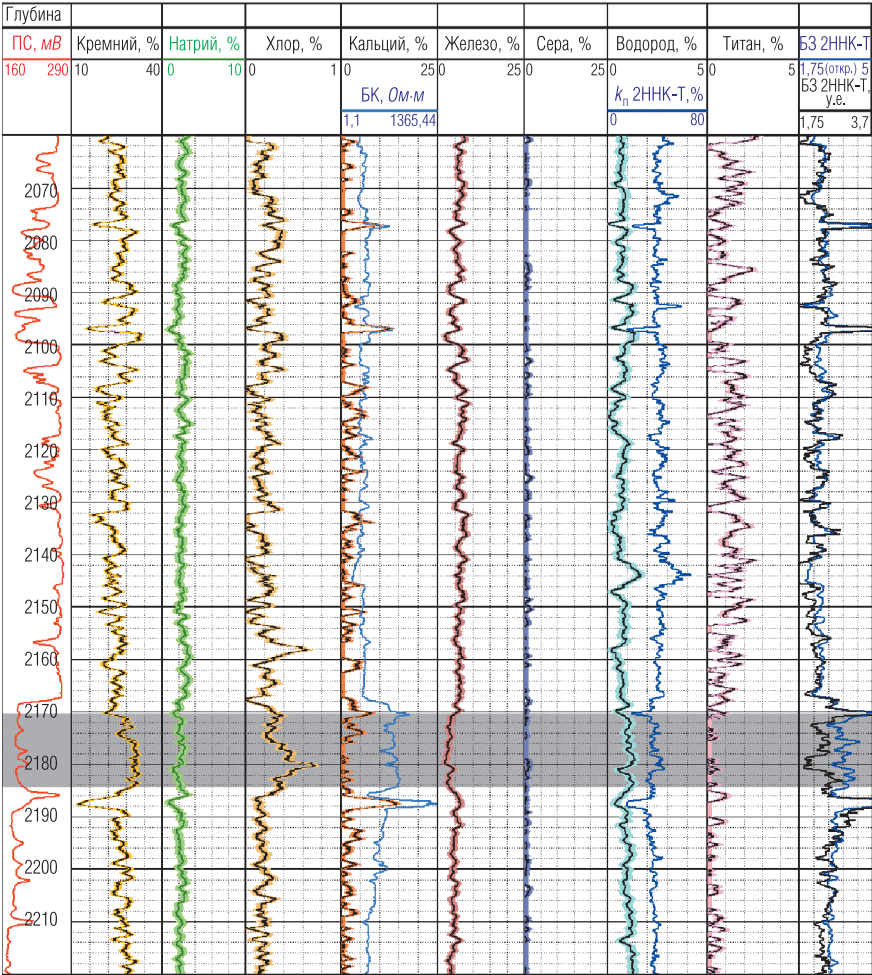


Рис. 3. Пример расчета массовых содержаний по результатам каротажа в закрытом стволе

На рис. 3 приведены результаты исследований, выполненных в закрытом стволе. Так же, как и в открытом стволе, по данным СНГК отчетливо выделяются уплотненные пропластки. Поведение кри-

вой массового содержания кальция в этих интервалах согласуется с данными бокового и нейтронного каротажа. Содержание серы в разрезе этой скважины невелико и сопоставимо с погрешностью ее определения. В верхней, более глинистой части интервала исследований наблюдается более высокое содержание титана – 0,3–0,4%. Это не противоречит данным, имеющимся по месторождению. Содержание титана в породе, оцениваемое по химическому анализу керна, составляет от 0,15 до 0,55%. Эта скважина интересна оценкой содержания хлора. Пластовые воды слабоминерализованы (~ 20 г/л NaCl). Среднее значение массового содержания хлора, определяемое по данным СНГК, составляет примерно 0,2%, что равно 25 г/л NaCl. В интервале 2170–2185 наблюдается увеличение массового содержания хлора в два раза. Согласно ранее проведенным исследованиям в открытом стволе данный интервал был газоносным. В настоящее время интервал является водоносным, что отчетливо видно при сравнении последних показаний нейтронного каротажа с показаниями в открытом стволе. Механизм появления хлорной аномалии неясен.

Проведенный анализ модельных и скважинных измерений позволил уточнить методику обработки СНГК. Полученные данные показали, что выбранная методика оценки массовых содержаний обеспечивает ранее заявленную [1] точность определения массовых содержаний элементов: кальция, кремния и железа – 2–3%, натрия и серы – 1,5%, водорода, титана и хлора – 0,2–0,3%. Информация, получаемая при обработке данных СНГК, может в дальнейшем использоваться для оценки литологии и моделировании физических свойств пород.

Авторы выражают благодарность сотрудникам треста “Сургут-нефтегеофизика” Н. К. Глебчевой, Е. М. Зыкиной, Э. Н. Биркун за оказанную помощь при выполнении данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лобода Н. Г., Велижанин В. А., Бубеев А. А. Математическое моделирование спектрометрического нейтронного гамма-каротажа // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2010. Вып. 7 (196). С. 154.