

Производственный опыт

УДК 550.832

В. М. Теленков, Р. Т. Хаматдинов
ООО "Нефтегазгеофизика"

ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННОГО КОМПЛЕКСА ГИС ПО ДЕТАЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ПОРОД БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

Рассмотрены возможности специальных методов ГИС, область их применения, точность определения параметров; предложен полный комплекс ГИС для литологического расчленения пород баженовской свиты.

Ключевые слова: горные породы, баженовская свита, каротаж, специальные методы ГИС, интерпретация.

Общие сведения

Баженовская свита – одна из наиболее интересных и специфических геологических формаций в разрезе мезозоя Западной Сибири. В настоящее время она является одним из важных перспективных региональных продуктивных объектов.

Отложения баженовской свиты расположены в центральной части Западно-Сибирского нефтегазоносного района. Глубина залегания свиты изменяется от 2100 до 3500 м при толщине от 10 до 40–50 м.

Породы свиты подразделяются на пять групп: низкоглинистые, высококремнистые, высокоглинистые, низкокремнистые, карбонаты. В аномальных разрезах – глинисто-алеврито-песчанистые [2].

В разрезе не наблюдается каких-либо закономерностей в положении того или другого типов пород. Состав пород баженовской свиты по данным [2] приведен в табл. 1.

Таблица 1

Основные показатели состава пород баженовской свиты
в центральных районах Западно-Сибирского осадочного бассейна*

Порода		Содержание, %						
		С _{орг}	Глина	Кварц	Кальцит	Доломит	Суммы карбонатов	Пирит
Глинисто-кремнистая	В целом	11,0 — 2,6–28,0	23,0 — 5,2–40,0	42,6 — 4,5–78,0	2,9 — 0–38,0	1,6 — 0–20,0	4,5 — 0–38,0	7,8 — 1,0–34,0
	В том числе низкокарбонатные	11,0 — 2,6–28,0	23,2 — 5,2–40,0	44,3 — 4,4–18,0	1,2 — 0–10,4	1,2 — 0–6,8	2,5 — 0–10,4	7,7 — 1,0–34,0
	В том числе повышенно-карбонатные	11,0 — 5,8–20,0	20,3 — 6,1–37,8	28,1 — 9,5–50,0	16,2 — 3,4–38,0	5,1 — 0–20,0	21,2 — 14,2–38,0	8,6 — 1,5–21,2
Высокоглинистая (аргиллиты)		3,0 — 0,8–7,4	50,4 — 40,0–84,0	24,0 — 7–38,0	1,6 — 0–9,0	1,0 — 0–6,0	2,6 — 0–9,4	3,5 — 0,5–13,0
Песчано-глинистая		0,4 — 0,15–0,8	26,0 — 9,0–51,0	24,0 — 15–37,0	8,8 — 0–28,0	11,2 — 0–21,0	20,0 — 2,0–51,0	0,7 — 0–3,5
Карбонатная		2,8 — 1,7–8,1	6,2 — 0,15–16,0	8,0 — 1,7–27,0	18,0 — 5,0–51,0	52,7 — 21,0–68,0	71,0 — 56,0–84,0	3,2 — 0,5–6,7

Примечание. * ИНГТ СО РАН.

В разрезах баженовской свиты наиболее распространены кремнисто-глинистые породы, составляющие в среднем 76% разреза свиты, с максимальным обогащением в среднем 11% органического материала. Аргиллиты составляют порядка 18% разреза и отличаются низким (в среднем 3%) содержанием органического материала. Карбонатные породы, представленные кальцитом и доломитом, составляют 0–3% с содержанием органического вещества в среднем 2,8% [2].

Из вторичных минералов породы баженовской свиты содержат в большей степени пирит и в меньшей – сидерит. Максимальное содержание (до 10%) пирита отмечается в глинисто-кремнистых породах, в аргиллитах и карбонатных породах – порядка 3–5%, в глинисто-алевролитово-песчаных – 0,7% [2].

Слагающие разрез породы баженовской свиты значительно различаются по фильтрационно-емкостным свойствам (ФЕС). Кремнисто-глинистые породы, обладающие максимальным содержанием органического вещества в твердом и жидком виде, как правило, практически непроницаемы. Повышенными коллекторскими свойствами, в силу своей структуры и трещиноватости, обладают карбонатные разности пород.

При разведке и эксплуатации баженовской свиты необходимо наряду с достаточно дорогостоящими исследованиями керна выполнять оптимальный комплекс ГИС для детального расчленения разреза.

К настоящему времени детальное изучение литологии пород баженовской свиты, определение ФЕС основывается главным образом на данных керна.

Подобные работы достаточно дорогостоящие и длительные по времени, что делает возможным их проведение лишь в отдельных разведочных и оценочных скважинах. Дистанционное изучение разреза применяемым комплексом ГИС, в силу особенностей строения пород баженовской свиты, недостаточно информативно. Отсутствуют методические подходы к выбору и к обоснованию современного комплекса ГИС и по обработке полученных данных.

По результатам опытно-промышленной эксплуатации объектов баженовской свиты установлено, что промышленные притоки получены из определенного типа пород, которые не всегда закономерно распределены по толщине свиты. Возникает необходимость в нахождении возможности детального литологического расчленения пород свиты и выделения перспективных проницаемых интервалов малозатратными геофизическими методами.

В то же время разнообразие минералов и химических элементов слагающих пород с присущими им физическими свойствами позволяет на основе современных комплексов ГИС достаточно детально определять литологию по толще баженовской свиты.

К настоящему времени в России создан и используется на практике современный комплекс ядерно-геофизических методов в сочетании с фокусированными электрическими методами, что позволяет решать поставленную задачу детального расчленения разреза по литологии.

Возможности литологического выделения пород баженовской свиты

В силу специфичности слагающих свиту пород стандартный комплекс методов, включающих в себя электрический, нейтронный, плотностной, акустический и гамма-каротаж, недостаточно информативен для решения поставленной задачи.

Причинами низкой информативности стандартного комплекса ГИС являются специфичность литологического строения пород и наличие твердых и жидких углеводородов. Повышенное и неравномерное содержание органического материала от 2 до 25% объема пород с плотностью порядка $1,3 \text{ г/см}^3$ делает невозможным определение общей пористости слагающих свиту пород. По данным нейтронного каротажа, измеряемое водородосодержание значительно завышено из-за наличия органического вещества, что также делает невозможным детальное литологическое расчленение пород. Удельные сопротивления за счет наличия органического вещества значительно завышены. На качественном уровне возможно выделение более уплотненных и высокопроводимых прослоев с детальностью по толщине пластов $\pm 0,5 \text{ м}$ без литологического расчленения.

Полученные данные позволяют определить границы баженовской свиты на качественном уровне с детальностью $0,5 \text{ м}$, выделить уплотненные разности и высокопроводящие прослои пород, оценить распределение органического вещества в породах свиты по данным гамма-каротажа.

Детальное расчленение пород баженовской свиты и построение литологической модели может быть достигнуто введением в комплекс дополнительных методов ГИС. В частности, предлагается дополнительно ввести в комплекс ГИС спектральный гамма-каротаж (СГК),

спектральный нейтронный гамма-каротаж (СНГК), углеродно-кислородный (C/O) и литоплотностной (ГГК-ПЛ) каротажи.

Введение в комплекс ГИС указанных методов основывается на следующих принципах.

По данным СНГК с детальностью 0,5 м возможно количественное определение массового содержания кальция, кремния и железа с погрешностями 2–3%, натрия и серы – 1,5%, титана и хлора – 0,2–0,3%. Указанные химические элементы являются основными в породах баженовской свиты (табл. 1) и изменяются в достаточно широком диапазоне [7].

Метод литоплотностного каротажа, наряду с определением общей плотности пород с погрешностью $\pm 0,03 \text{ г/см}^3$, также определяет фотоэлектронный индекс с погрешностью $\pm 0,20$ ед. Ре (табл. 2) [4].

Таблица 2

Параметры основных породообразующих минералов и флюидов

Минерал, флюид	Химическая формула	$\rho_{\text{об}}, \text{г/см}^3$	$\rho_e, \text{г/см}^3$	$\rho_{\text{экв}}, \text{г/см}^3$	Ре	$Z_{\text{эф}}$
Вода	H ₂ O	1,00	1,1101	1,00	0,36	7,53
Нефть	CH ₂	0,76	1,1407	0,85	0,12	5,55
Метан	CH ₄	0,00072	0,0009	0,0009	0,095	5,20
Кальцит	CaCO ₃	2,71	2,708	2,71	5,08	15,71
Кальцит, $k_n = 35\%$	0,65* CaCO ₃ + 0,35* H ₂ O	2,11	2,11	–	4,23	–
Кварц	SiO ₂	2,65	2,65	2,648	1,81	11,79
Кварц, $k_n = 35\%$	0,65* SiO ₂ + 0,35* H ₂ O	2,07	2,07	–	1,54	–
Доломит	CaMg(CO ₃) ₂	2,87	2,863	2,876	3,14	13,75
Доломит, $k_n = 35\%$	0,65* CaMg(CO ₃) ₂ + 0,35* H ₂ O	2,22	2,21	–	2,66	–
Полевой шпат	0,5KAlSi ₃ O ₈ + 0,5NaAlSi ₃ O ₈	2,60	2,620	2,59	2,11	12,31
Ангидрит	CaSO ₄	2,96	2,957	2,977	5,05	15,69
Гипс	CaSO ₄ *2H ₂ O	2,32	2,372	2,315	3,98	14,68
Галит	NaCl	2,165	2,074	2,032	4,65	15,33
Сильвин	KCl	1,984	1,916	1,863	8,51	18,14

Введение в комплекс ГИС метода ГГК-ПЛ в комплексе с данными СНГК позволяет разделить карбонатные породы на кальциты и доломиты (табл. 2).

Метод углеродно-кислородного каротажа, широко используемый в практике оценки текущей нефтенасыщенности по содержанию углерода, с погрешностью 2–3% абс. при наличии содержания твердого органического вещества с большим содержанием углерода, позволяет оценить содержание керогена при детальности расчленения разреза ± 1 м [3]. Дополнительным методом оценки содержания органического вещества в породах баженовской свиты является спектральный гамма-каротаж.

Как известно из практики нефтяного дела, органическое вещество (ОВ) способно аккумулировать уран, что значительно увеличивает гамма-излучение пород и позволяет на качественном уровне, при превышении гамма-активности выше вмещающих пород, определять наличие органического вещества и его распределение в породе.

При наличии петрофизических зависимостей (керна–ГИС), по урановой составляющей гамма-излучения возможно определение содержания органического вещества в объеме пород. Следует отметить, что получаемые данные имеют высокую погрешность за счет гамма-излучения пород свиты [5].

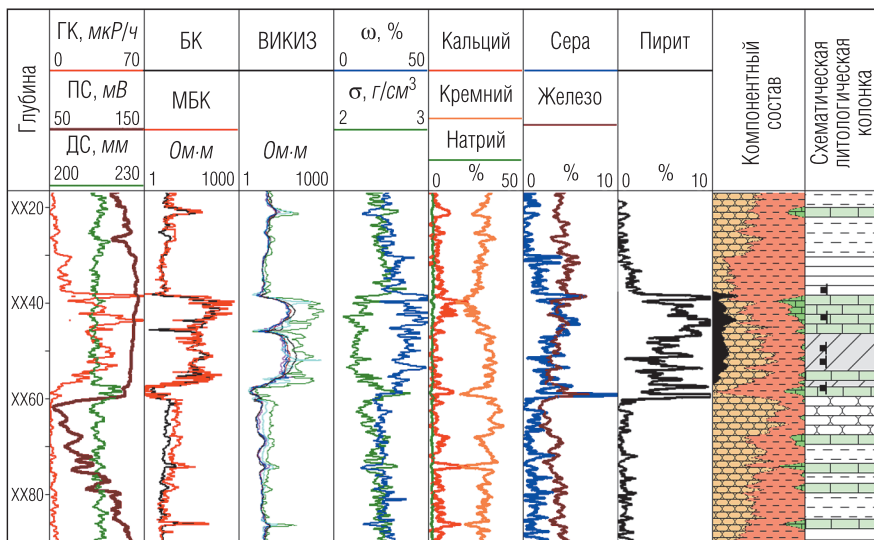
Дополнительно получаемые количественные данные ториевой и калиевой составляющих гамма-излучения позволяют наряду с данными спектрального нейтронного каротажа повысить однозначность литологического расчленения пород с выделением глинистых и песчаных разностей пород.

На приведенных примерах рассматриваются возможности предлагаемых методов ГИС для решения задачи литологического расчленения пород (рис. 1–5).

На рис. 1, 2 комплекс ГИС включает в себя электрические методы, нейтронный, плотностной, интегральный гамма-каротаж и спектральный нейтронный каротаж.

На рис. 1 по данным электрических методов в комплексе с гамма-, плотностным и нейтронным каротажными выделены границы баженовской свиты в интервале 39–59 м, а также уплотненные и низкоомные пропластки пород.

По результатам спектрального нейтронного каротажа в сопоставлении с классификацией в табл. 1 на основе данных основных поро-



Компонентный состав: распределение органического вещества в породах баженовской свиты
 кварц глина карбонаты
 Литология: аргиллит песчаник алевролит глинистые карбонаты
 пирит кремнисто-глинистый сланец

Рис. 1. Литологическое выделение пород баженовской свиты комплексом ГИС

дообразующих элементов Ca, Na, Si, Fe, S проведено дополнительное расчленение разреза, выделены карбонатные, кремнисто-глинистые породы. Наличие карбонатных прослоев отмечено в интервалах хх39–хх44,6 и хх55–хх56 м.

Содержание кальция в указанных интервалах составляет до 15%, что соответствует карбонатизации пород. Остальная часть разреза представлена кремнисто-глинистыми породами с содержанием кремния до 40% объема породы.

Содержание железа по разрезу баженовской свиты изменяется от 2,5 до 7%, серы – от 3 до 8%.

По результатам комплексной обработки и данным о содержании железа и серы установлено количество пирита в исследуемой части разреза.

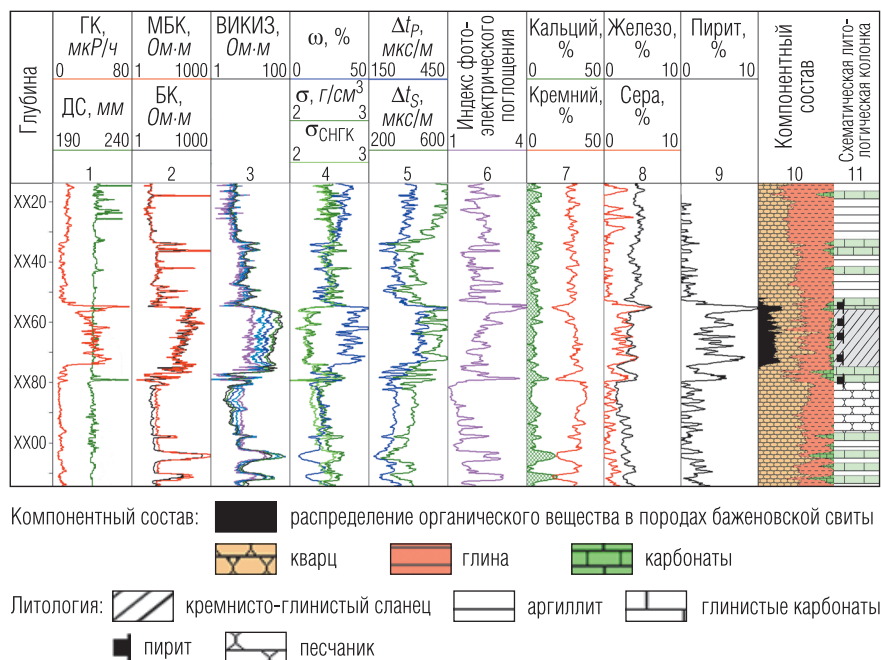


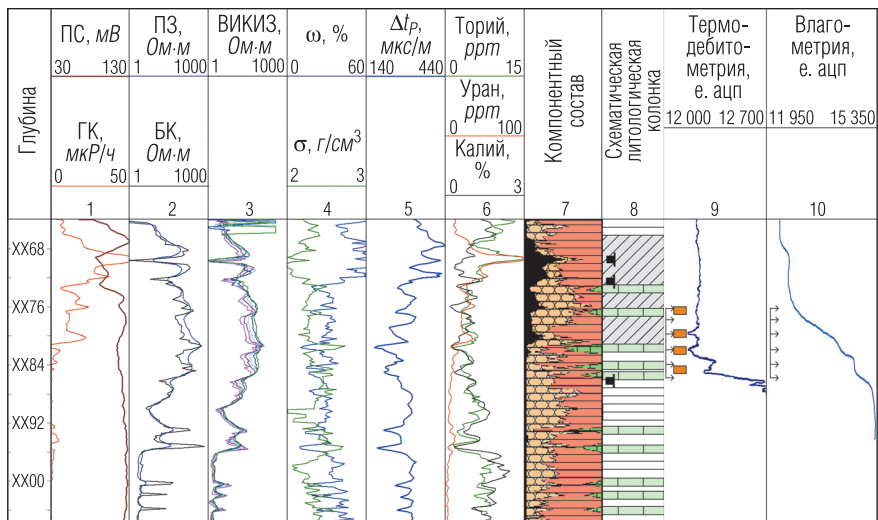
Рис. 2. Литологическое выделение пород баженовской свиты комплексом ГИС

Наличие пиритизации разреза косвенно подтверждается повышенной проводимостью пород по данным электрических методов и снижением сопротивления по отдельным интервалам от 600 до 5–10 Ом·м. В исследуемой скважине породы баженовской свиты пиритизированы по всей толще пласта. Содержание пирита колеблется в пределах 0–10%.

На рис. 2 в исследуемой скважине дополнительно проведен литолого-плотностной каротаж.

Наличие данных литолого-плотностного каротажа позволяет в комплексе со спектральным нейтронным каротажем более однозначно выделить карбонатные породы в интервалах хх55–хх56 и хх75–хх77 м.

Содержание кальция в породах составляет от 2 до 12%. Значениями фотоэлектронного индекса 4–5 характеризуются доломитизированные известняки. Остальная часть разреза представлена кремнисто-гли-



Компонентный состав: распределение органического вещества в породах баженовской свиты
 кварц глина карбонаты
 Литология: кремнисто-глинистый сланец аргиллит глинистые карбонаты
 пирит
 Притоки: нефть

Рис. 3. Литологическое выделение пород и интервалов притока при испытании баженовской свиты

нистыми породами с содержанием кремния до 40% объема пород. Содержание железа изменяется от 4 до 6%, серы – от 2 до 6%.

По наличию серы и железа рассчитано содержание пирита, которое по разрезу изменяется от 2 до 10% объема пород.

Как уже отмечено выше, наличие пиритизации пород также подтверждается повышением проводимости пород по данным индукционного каротажа (интервал хх44–хх85 м).

Необходимость детального литологического расчленения пород баженовской свиты связано с прогнозом наличия проницаемых зон. Породы баженовской свиты обладают различными ФЕС. Составляющие основной объем отложения баженовской свиты кремнисто-глинистые сланцы с большим содержанием органического вещества

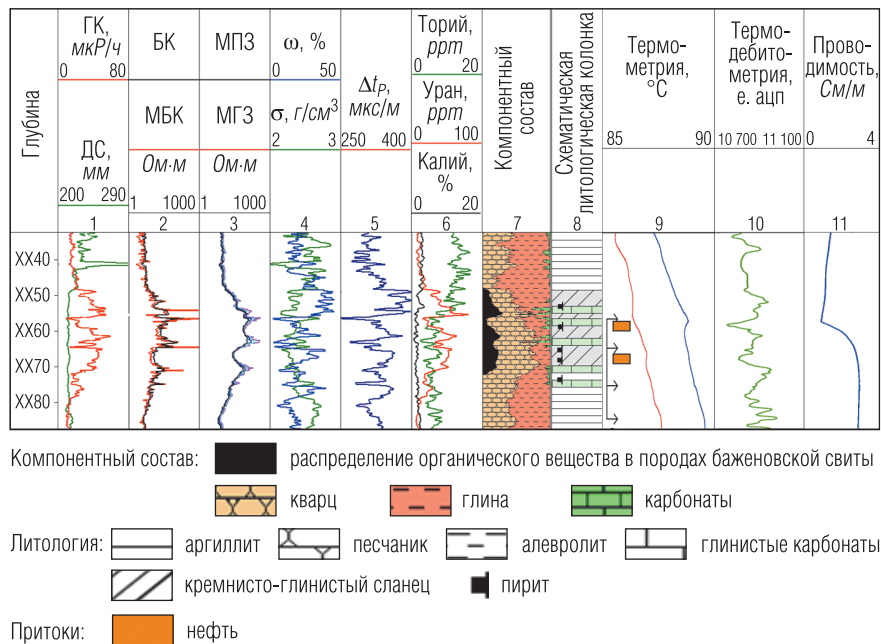


Рис. 4. Литологическое выделение пород и интервалов притока при испытании баженовской свиты

[2] и емкостным пространством [1, 2, 6] в большинстве случаев непроницаемы.

Карбонатные породы с наличием трещинно-каверновой пористости [6] отличаются определенной проницаемостью, что определяет каналы фильтрации флюидов.

На рис. 3, 4 приведены результаты определения интервалов притока в сопоставлении с литологией пород баженовской свиты. Литологическое расчленение с детальностью ± 1 м проведено комплексом методов акустического, нейтронного, плотностного, электрического и гамма-каротажа.

Выделение карбонатных прослоев произведено по повышенным значениям удельного сопротивления, повышенной плотности, уменьшению водородосодержания и гамма-активности пород, уменьшению времени пробега продольной волны. Следует отметить, что указан-

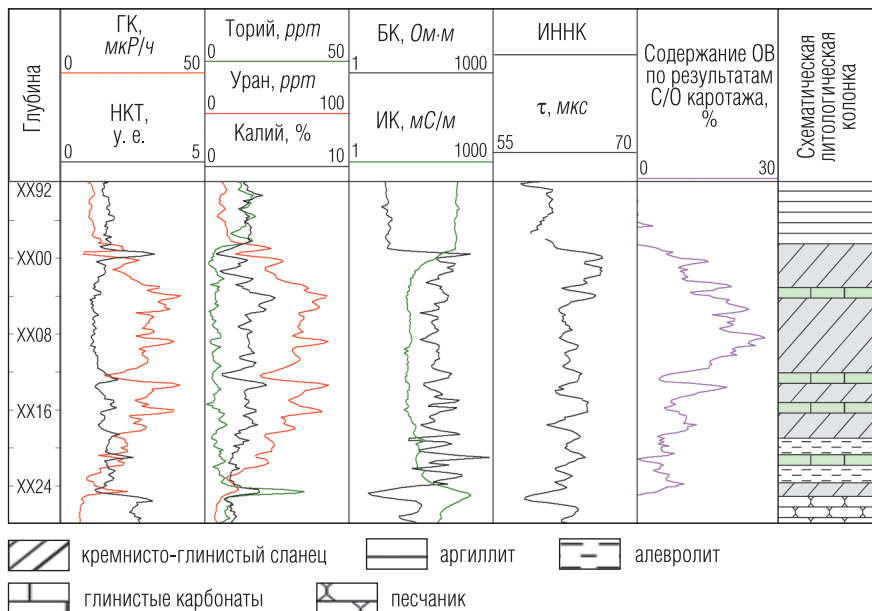


Рис. 5. Определение содержания органического вещества в породах бажен-
новской свиты методом углеродно-кислородного каротажа

ные признаки не противоречат данным, полученным расширенным комплексом ГИС.

По полученным данным интервалы притока в основном приурочены к границам карбонатных прослоев (рис. 3, 4, колонка 9).

Определение содержания органического вещества

Содержание органического вещества минимально в глинистых и карбонатных породах [2]. Повышенным содержанием отличаются кремнисто-глинистые породы [1, 2].

По данным ГИС определение содержания органического вещества в породах баженовской свиты возможно комплексом методов углеродно-кислородного каротажа и спектрального гамма-каротажа.

Как известно, аккумуляция радиоактивных элементов, в частности урановой составляющей [2, 6], связана с органическим веществом.

В породах баженовской свиты максимальное количество урановой составляющей, при минимальной концентрации тория, связано с глинисто-кремнистыми сланцами. Повышенное содержание тория связано с глинистыми и глинисто-алевролитистыми породами [2].

Включение в комплекс спектрального нейтронного гамма-каротажа позволяет не только производить литологическое выделение пород, но и на качественном уровне оценивать содержание органического вещества.

Углеродно-кислородный каротаж является прямым методом определения углерода в исследуемых породах, что дает возможность производить определение органического вещества в породах баженовской свиты с точностью 2–3% детальностью ± 1 м. Результаты исследований приведены на рис. 5.

По данным углеродно-кислородного каротажа, содержание органического вещества в объеме пород изменяется от 0 до 25%, максимальное содержание – до 25% в интервалах хх02–хх10, хх13–хх91 м. Минимальное содержание – 0–2% в интервалах хх12–хх13, хх18,4–хх24 м.

По данным спектрометрического гамма-каротажа максимальным содержаниям органического вещества соответствуют повышенные значения урановой составляющей.

Судя по повышенным значениям удельного сопротивления бокового каротажа и низким значениям гамма-активности урановой, ториевой и калиевой составляющих, низкие значения содержания органического вещества в породах баженовской свиты связаны с карбонатными породами.

Определение фильтрационно-емкостных свойств пород баженовской свиты

Определение коэффициентов пористости и выделение проникаемых интервалов возможно комплексом методов литоплотного, углеродно-кислородного и ядерно-магнитного каротажей.

Определение коэффициентов общей пористости предлагается осуществлять комплексом методов литоплотного и углеродно-кислородного каротажей.

Как отмечено выше, определение плотности матрицы пород свиты по прямым измерениям плотностного каротажа невозможно из-за влияния органического вещества.

Введение в комплекс углеродно-кислородного каротажа позволяет с высокой точностью определять объемное содержание органического вещества. Учитывая содержание органического вещества и величин минералогической плотности матрицы пород, определяемых по данным керна, возможно количественное определение коэффициентов общей пористости с погрешностью не более 2% абс.

Метод ядерно-магнитного каротажа позволяет также оценивать общую и эффективную пористость жидких углеводородов. Дополнительно выделяются потенциально проницаемые интервалы. Результаты исследований методом ЯМК приведены на рис. 6.

Как видно из приведенных данных, потенциальные коллекторы с эффективной пористостью отмечаются в интервале хх68–хх77 м.

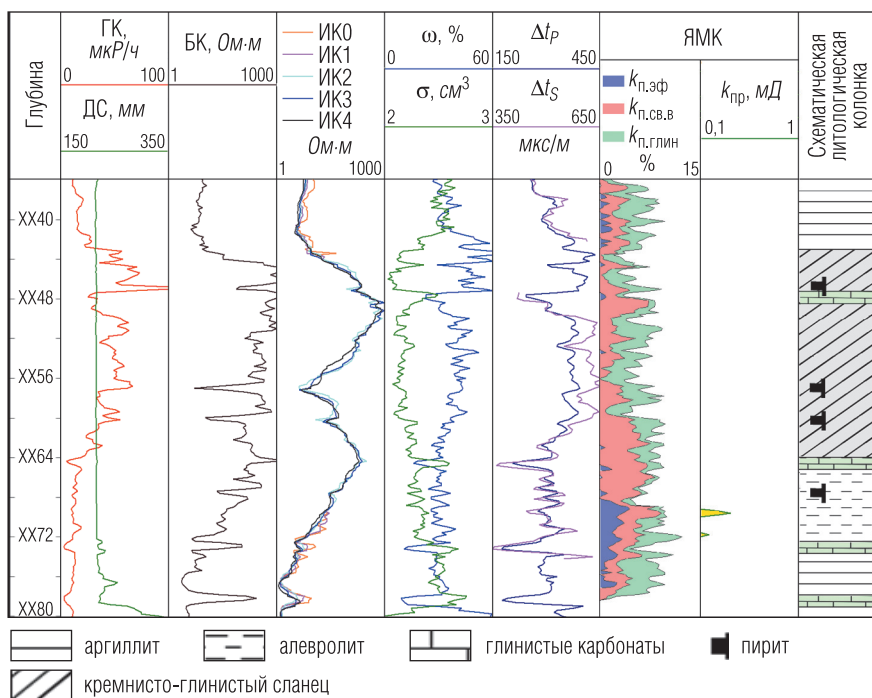


Рис. 6. Определение фильтрационно-емкостных свойств пород баженовской свиты методом ядерно-магнитного каротажа

Выше по разрезу в породах баженовской свиты наличие проницаемых коллекторов не отмечено.

Выводы и рекомендации

1. Представленные результаты дают основание для решения задач литологического расчленения пород баженовской свиты с детальностью по толщине 0,5 м комплексом геофизических методов, определения коэффициентов общей пористости и выделения потенциально проницаемых пород свиты.
2. Предлагается необходимый комплекс ГИС, включающий в себя следующие методы:
 - многозондовый индукционный каротаж;
 - многозондовый боковой каротаж;
 - микробоковой каротаж;
 - профилометрия;
 - спектральный гамма-каротаж;
 - компенсационный нейтронный каротаж;
 - спектральный нейтронный гамма-каротаж;
 - литолого-плотностной каротаж;
 - углеродно-кислородный каротаж;
 - ядерно-магнитный каротаж;
 - кроссдипольный акустический каротаж.
3. Аппаратурно-программный комплекс для реализации предложенного комплекса ГИС, выпускаемый ООО “Нефтегазгеофизика” (г. Тверь), позволяет решать большинство поставленных задач по информативному обеспечению исследования пород баженовской свиты.
4. Наличие необходимого аппаратурно-программного комплекса создает предпосылки для разработки комплексной методики информационного обеспечения промышленной эксплуатации продуктивных отложений баженовской свиты с определением петрофизических связей “керна–геофизика”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бордюк М. А., Славкин В. С., Гавриков С. С., Потряков А. А. Особенности строения и формирования аномального разреза баженовской свиты на примере Северо-Конитлорского месторождения // Геология нефти и газа. 2010. № 1. С. 32–40.

2. Занин Ю. Н., Замирайлова А. Г., Эдер В. Г. Некоторые аспекты формирования баженовской свиты в центральных районах Западно-Сибирского осадочного бассейна // Литосфера. 2005. № 4. С. 118–135.
3. Инструкция по проведению импульсного спектрометрического нейтронного гамма-каротажа аппаратурой серии АИМС и обработке результатов измерений при оценке текущей нефтенасыщенности пород (терригенные отложения). МИ 41-17-1399-04.
4. Инструкция по проведению спектрометрического гамма-каротажа аппаратурой SGK-1024 и обработке результатов измерений. МИ 41-17-1396-04.
5. Инструкция по проведению плотностного гамма-гамма-каротажа аппаратурой серии СГП и обработке результатов измерений. МИ 41-17-1401-04.
6. Калмыков Г. А., Балушина Н. С., Блохин В. С. Пустотное пространство пород баженовской свиты и возможности его исследования комплексом ГИС, ЯМР–ЯМК // Труды Всероссийской научно-практической конференции “Ядерно-магнитные скважинные и аналитические методы в комплексе ГИС при решении петрофизических, геофизических и геологических задач на нефтегазовых месторождениях”. Тверь, 2014. С. 249–265.
7. Лобода Н. Г. Разработка и внедрение методики оценки массовых содержаний породообразующих элементов в разрезах нефтяных скважин по данным спектрометрического нейтронного гамма-каротажа: Дисс. ... канд. тех. наук. Дубна, 2011. 107 с.

Рецензент доктор геол.-мин. наук, проф. Ю. И. Кузнецов