

ления при последовательных замерах газопроявление уменьшается, соответственно уменьшается амплитуда аномалий. Чувствительность УЗИ при выявлении интервалов притока газированной жидкости в данных условиях значительно выше чувствительности СТИ.

Опытно-методические работы, проведенные при содействии треста "Сургутнефтегеофизика" и Башгосуниверситета, позволяют сделать вывод о перспективности использования аппаратуры УЗИ в комплексе геофизических исследований эксплуатационных скважин.

УДК 550.832.582

*В. Ю. Барляев, В. В. Барташевич, В. К. Громцев,
А. С. Зеленов, Е. М. Митюшин, Р. Т. Хаматдинов*
ООО "Нефтегазгеофизика"

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО КАРОТАЖА В ИСКУССТВЕННОМ ПОЛЕ

Анализ результатов работ с новой технологией и аппаратурой ЯМК-ИП в более чем 100 скважинах России, Северной и Южной Америки показал их высокую эффективность.

С 2001 г. тверские геофизики проводят коммерческие работы по исследованию нефтяных и газовых скважин на основе российской технологии ядерно-магнитного каротажа в искусственном магнитном поле ЯМК-ИП [1, 2].

Лежащий в основе технологии новый способ регистрации эффекта ЯМР в скважине, использующий фокусированное радиочастотное поле и редкоземельный магнит, позволил поднять качество измерений. Способ защищен патентом Российской Федерации [3]. Получены патенты за рубежом (Норвегия, Великобритания, Канада, Мексика, Германия).

По разработанной технологии выполнены работы более чем в 100 скважинах на объектах отечественных компаний ЛУКОЙЛ, ТНК-ВР, Сургутнефтегаз, Газпром, Сибнефть, СИДАНКО и на объектах западных компаний в Северной и Южной Америке.

Исследования по технологии ЯМК-ИП скважинным прибором ЯМТК в России выполнены в осадочном чехле и фундаменте Русской платформы, Тимано-Печорской и Западно-Сибирской плит. В пределах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции исследованы продуктивные комплексы карбона, девона, а также архея. В Тимано-Печорской НГП исследованы продуктивные отложения пермского возраста. В основной нефтегазоносной провинции России – Западно-Сибирской – выполнены исследования в разрезах верхнего (сеноман) и нижнего (неоком) мела, юры и палеозоя. Исследованные ЯМК-ИП разрезы включали осадочные, магматические и метаморфические породы. Продуктивные комплексы были в основном представлены терригенными (кварцевые и аркозовые песчаники) и карбонатными породами. Глубины интервалов исследования скважин находились в диапазоне 500–4500 м, максимальная температура составляла 128 °С, давление – 60 МПа, угол наклона скважин до 40°.

Сопоставление результатов определения фильтрационно-емкостных свойств по ЯМК-ИП и прямых измерений на образцах керна было проведено в терригенных, карбонатных, магматических породах. Результаты показали соответствие в широком диапазоне изменения коллекторских свойств этих пород.

По сравнению результатов ЯМК-ИП с данными стандартного комплекса ГИС установлено, что метод объективно характеризует геологическое строение разреза. Реализованный в технологии комплекс аппаратурных и программно-методических решений позволил несмотря на объективно слабый по величине уровень регистрируемых сигналов ЯМР достичь достоверного и высокого разрешения по вертикали, сопоставимого с ВИКИЗ в терригенном разрезе и нейтронным каротажом в карбонатном разрезе.

Использование результатов ЯМК-ИП рекомендовано “Методическими рекомендациями по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом”, согласованными с ГКЗ МПР России.

Главный вывод производственного применения заключается в том, что мы ни разу не столкнулись с геологическими условиями, то есть свойствами пород, при которых нельзя в полном объеме неза-

висимо от литологии оценить фильтрационно-емкостные характеристики и структуру порового пространства пород в скважине [4]. Ограничения ЯМК, связанные с наличием в пластах газа или тяжелых нефтей (битума), достаточно надежно снимаются в комплексе с ГИС (ЭК, РК) [5].

В то же время на первом этапе применения ЯМК-ИП мы столкнулись с ограничениями, связанными с термобарическими условиями, большим диаметром скважинного прибора ЯМТК, влиянием свойств бурового раствора (проводимость раствора) на характеристики зонда скважинного прибора.

Затруднения, связанные с термобаростойкостью, присущи всем геофизическим приборам и решаются выбором материалов, электронных элементов, конструкции и технологии. Там, где это не удается сделать, применяют термостаты. В данной статье сделана попытка объяснить некоторые особенности, которые свойственны приборам ЯМТК.

Электронная база для термостойкого скважинного прибора ЯМТК-Т подвергалась тестированию и отбору на температуру до 180–200 °С. Тем не менее в приборе осталось несколько элементов, которые не выдержали предъявляемых к ним требований – это накопительные высоковольтные электролитические конденсаторы для блока энергетики скважинного прибора и элементы предусилителя сигналов ядерной индукции, поэтому их поместили в термостаты. Обычный термостат с поглотителем тепла не подходил, так как позволял снизить температуру в скважинном приборе не более чем на 6 ч. Условия работы скважинного прибора ЯМТК таковы, что он может находиться в скважине до 10–24 ч, поэтому разработаны конструкция прибора и термостат с активным поглотителем тепла на основе элемента Пельтье. Элемент Пельтье под действием тока может создавать на своих различных поверхностях перепад температуры до 60 °С. Холодная поверхность Пельтье помещается в сосуд Дюара, а горячая поверхность соединяется с радиатором, отдающим тепло в скважину. Результат работы такого термостата показан на рис. 1. Внешняя температура скважинного прибора составляла 180 °С в течение 24 ч, внутренняя температура в термостате не превысила 120 °С. Скважинные испытания в Венесуэле при температуре 145 °С подтвердили эти результаты. Температура в термостатах не превысила 80 °С в течение 10 ч непрерывной работы прибора в скважине.

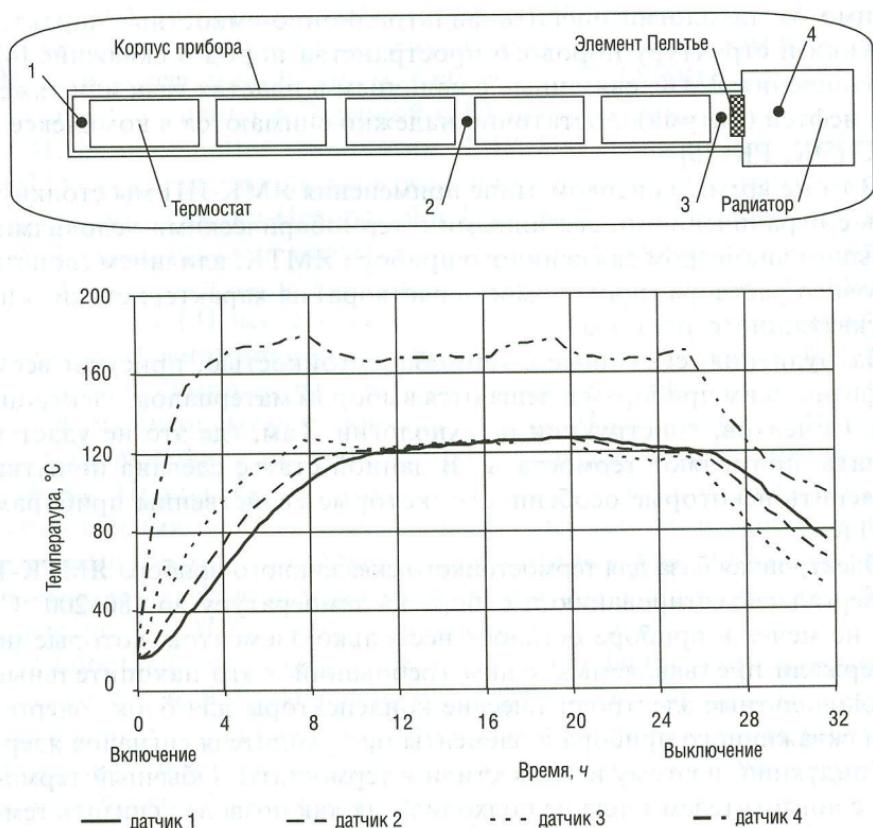


Рис. 1. Изменение окружающей температуры прибора и температуры в сосудах Дюара от времени в ч

Для увеличения термостойкости и баростойкости зонда ЯМТК разработаны и применены:

1. Материал для магнита на основе Nd-Fe-Bg с рабочей температурой от минус 50 °С до плюс 180 °С и технология изготовления термостойких магнитов разных диаметров.
2. Специальные высокодобротные термостойкие провода для приемо-передающей радиочастотной катушки.
3. Высоковольтные и высокодобротные термостойкие конденсаторы для резонансного контура.

4. Высокопрочные и термостойкие материалы и элементы конструкции радиопрозрачного корпуса двух диаметров.

Эти работы проводились в кооперации с российскими и зарубежными фирмами, производителями материалов и элементов.

В результате созданы зонды двух типоразмеров:

- 145 мм – для скважин диаметром 190–290 мм;
- 120 мм – для скважин диаметром 160–215 мм.

Оба типоразмера зондов выполнены для работы при температуре от -50 до $+175$ °С и давлении до 120 МПа.

Было бы ошибкой считать, что вопрос термостойкости прибора решается только подбором электронных элементов и с помощью терmostатов. Эти мероприятия позволяют сохранить работоспособность прибора при высоких температурах. Однако, кроме этого, необходимо гарантировать заказчику тот минимум метрологических характеристик прибора, при которых возможно получить надежный окончательный результат, то есть интегральные значения пористости и спектры распределения пористости по временам релаксации (T_2).

Зонд прибора ЯМК невозможно защитить от воздействий окружающей среды. Аналоговые цепи приемопередающего контура зонда под действием внешних условий – температуры, проводимости бурового раствора, сопротивления пластов в скважине меняют свои амплитудно-частотные и фазовые характеристики (АЧХ и ФЧХ). С увеличением температуры в скважине возрастает сопротивление приемопередающей катушки, при этом изменяются коэффициент передачи входных цепей и фаза сигналов спин-эхо. Аналогичное воздействие на входные цепи оказывает вносимое сопротивление, вызванное проводимостью бурового раствора и пластов, окружающих скважину. И в том и другом случае отношение сигнал/шум измеряемых сигналов спин-эхо уменьшается.

Изменения коэффициента передачи и фазы сигнала можно проконтролировать, для этого перед каждым циклом измерений сигналов ЯМР производят калибровку прибора. С помощью специальной катушки, находящейся в зонде, измеряют АЧХ зонда и фазу сигнала ядерной индукции. Эти данные в цифровом виде сопоставляют с аналогичными данными, полученными в нормальных условиях при базовой эталонировке прибора, и производят коррекцию амплитуды и фазы сигналов спин-эхо. Калибровка является неотъемлемой час-

тью цикла измерений. Все преобразования производят в скважинном приборе. Для этого процессор скважинного прибора "перерабатывает", примерно, 1 *Мбайт* измерительной информации в режиме калибровки и 10 *Мбайт* при измерении одной релаксационной кривой в одном цикле измерений. На дневную поверхность передают откорректированные на влияние окружающей среды значения релаксационной кривой (800 *байт*), кроме этого, переходные характеристики входных цепей, комплексный коэффициент передачи и целый ряд технических параметров (температура и напряжения в различных точках прибора, параметры радиоимпульсов и т. д., всего 90 мемоник). Все эти данные позволяют контролировать состояние скважинного прибора. Комплексный коэффициент передачи может иметь при интерпретации самостоятельное значение, так как, помимо информации о влиянии скважины, несет информацию о сопротивлении пластов. Разрешающая способность коэффициента передачи по сопротивлению пластов сопоставима с коротким зондом ВИКИЗ и БМК.

Важнейшей метрологической характеристикой зондов является среднеквадратичное отношение шума зонда (прибора), измеренное при отсутствии сигнала ЯМР в процентах пористости (мнемоника СКО). Это значение определяет отношение сигнал/шум сигнала ЯМР и чувствительность прибора. От значения СКО зависит качество спектров, которые получают при обработке релаксационных кривых.

На рис. 2 показано (при 3 накоплениях ЯМР сигнала), как изменялось СКО от температуры в скважине у двух различных приборов, изготовленных на температуру 125 °С. Чёрные точки соответствуют прибору № 1, светлые точки прибору № 2. Эти данные получены в скважинах с пресным буровым раствором. Чёрная и светлая кривые на рис. 2 построены путем подбора аппроксимирующих функций и интерполированы на 150 °С. Скважинные испытания термостойкого прибора, отмеченные квадратиками на рис. 2, подтвердили прогноз о неизбежном и резком возрастании СКО при температурах более 120 °С. СКО при температуре 145 °С увеличилось почти в 3 раза. Этот процесс связан с физикой явлений, изменяющих сопротивление элементов зонда при высоких температурах. Ослабить его возможно конструктивно на стадии проектирования и изготовления зонда, оптимизируя соотношение активной и реактивной составляющих сопротив-

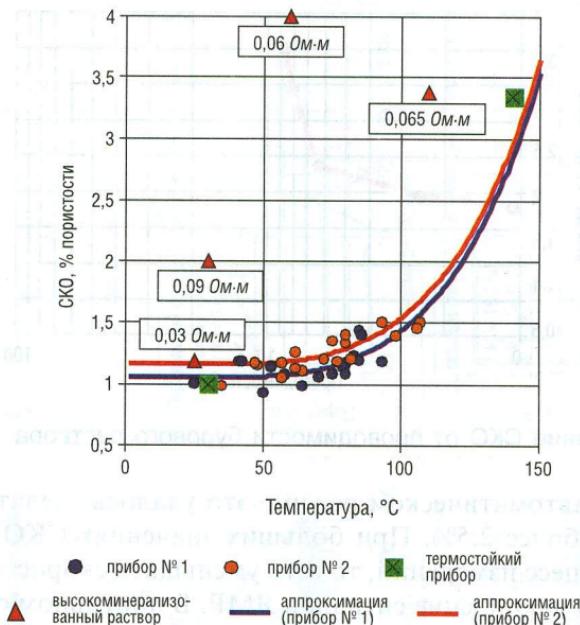


Рис. 2. Изменение СКО от температуры и сопротивления бурого раствора
зависимости СКО от температуры и сопротивления бурого раствора. Не следует также забывать, что с ростом температуры уменьшается сигнал ЯМР.

Резкое увеличение СКО можно также наблюдать и при увеличении проводимости бурого раствора. На рис. 2 треугольниками показаны значения СКО в скважинах с соленым бурым раствором, на рис. 3 – зависимость СКО от проводимости бурого раствора.

Таким образом, мы столкнулись с объективными физическими явлениями, которые снижают амплитуду сигнала ЯМР и резко повышают шум скважинного прибора (зонда) при температурах более 120 °C. Проводимость бурого раствора более 10 Смм также негативно сказывается на результатах измерений.

Поэтому, помимо разработки термостойкого прибора, необходимо было разработать устойчивые к шуму алгоритмы обработки релаксационных кривых, которые при малых отношениях сигнал/шум позволяют получить интегральные значения пористости во всем диапазоне ее изменения и неискаженные спектры сигналов. В настоя-



Рис. 3. Изменение СКО от проводимости бурого раствора

щее время в автоматическом режиме это удалось сделать при значении СКО не более 2,5%. При больших значениях СКО необходимо изменять процесс измерений, то есть уменьшать скорость каротажа и осуществлять накопление сигналов ЯМР. В противном случае достоверность восстановления спектров времен релаксации T_2 существенно снижается.

В качестве примера на рис. 4 показано, как изменяются амплитудно-частотная характеристика прибора (АЧХ), релаксационная кривая и спектры сигналов в одной и той же точке скважины после замены пресного раствора на соленый ($0,065 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Коэффициент передачи уменьшился в два раза, а СКО увеличилось в 3 раза. Спектр сигнала стал более "размытым". Однако интегральные значения пористости изменились незначительно. При накоплении сигнала по 7 измерениям спектр практически восстановил свою первоначальную форму.

Результаты измерений по разрезу в скважине (рис. 5) при ее заполнении пресным и высокоминерализованным раствором показали приемлемую воспроизводимость результатов обработки даже в области нижней границы применения метода. Автоматическая калибровка прибора и алгоритм обработки релаксационных кривых позволили без вмешательства оператора получить практически одинаковые результаты обоих измерений как по бинам (колонки 1, 2), так и по пористости (колонки 5, 6). Увеличение СКО при замере в соленом буром растворе сказалось в незначительном размывании границ плас-

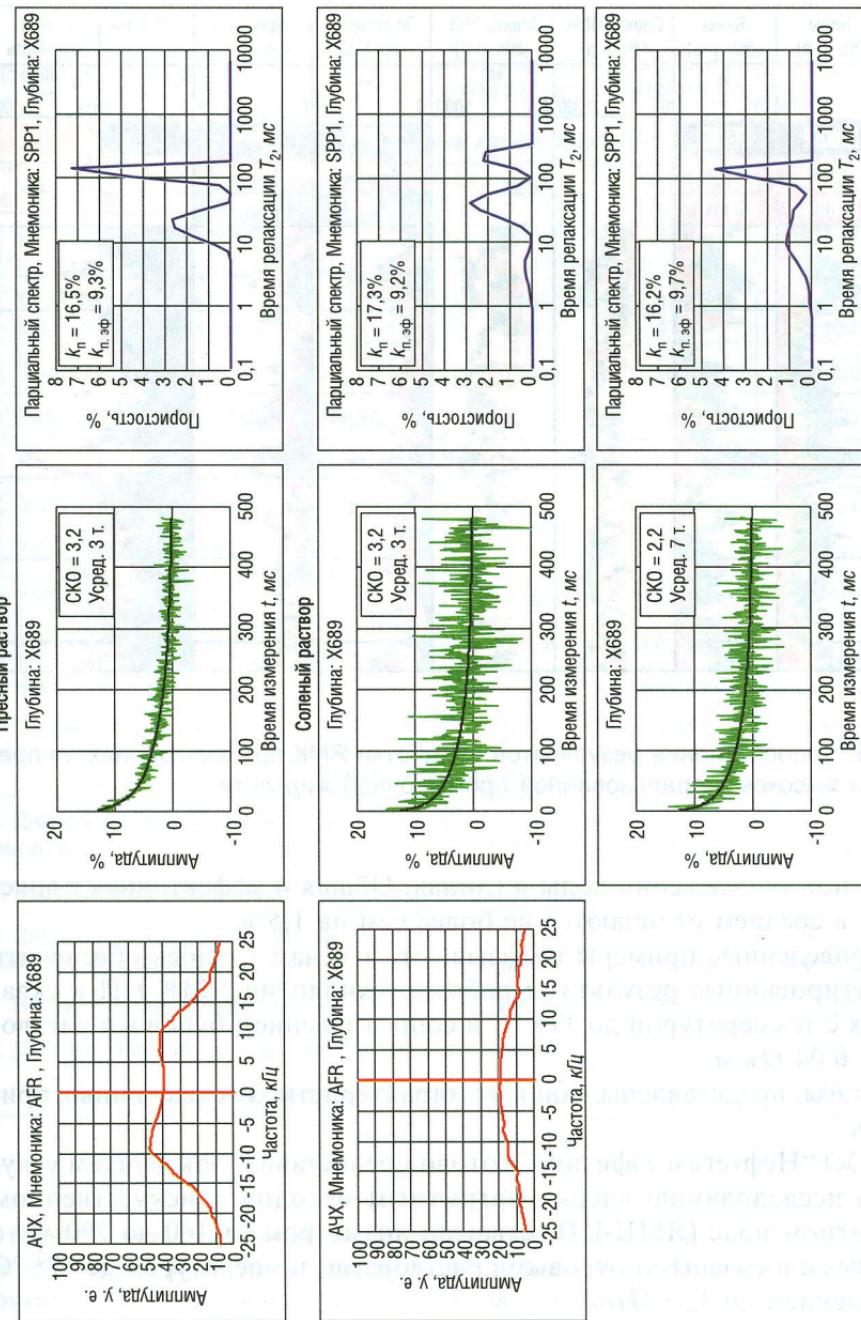


Рис. 4. Изменение АЧХ, СКО и спектров в скважине с пресным и соленым растворами

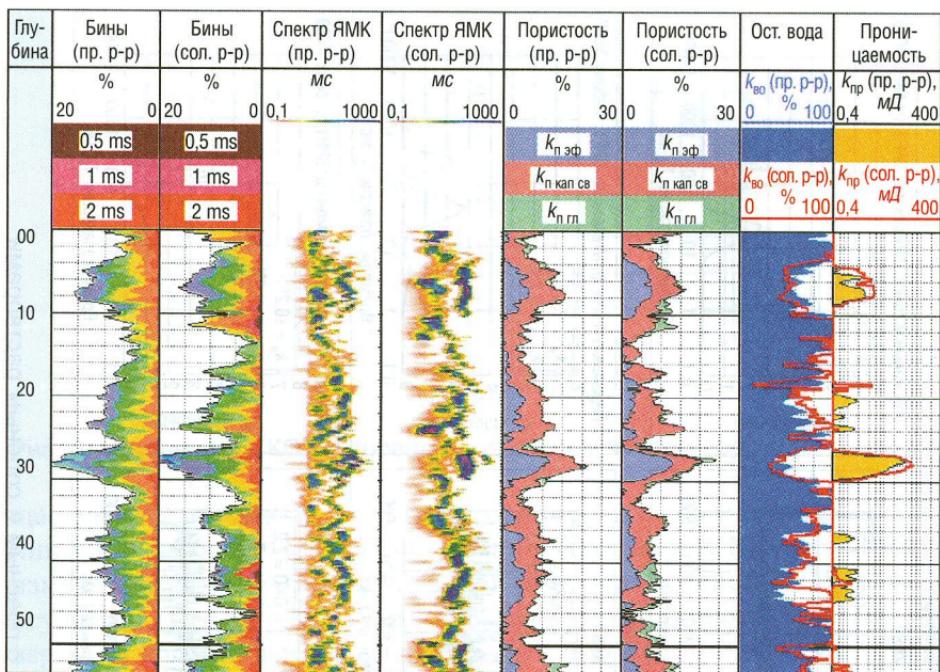


Рис. 5. Сопоставление результатов обработки ЯМК при измерениях на пресной и высокоминерализованной промывочной жидкости

тов и при определении воды в глинах. Общая и эффективная пористость в среднем отличаются не более чем на 1,5%.

Приведенные примеры показывают, что нам удалось обеспечить гарантированные результаты работы технологии ЯМК-ИП в скважинах с температурой до 175 °C и сопротивлением бурового раствора до 0,04 Ом·м.

В табл. представлены данные о характеристиках скважинных приборов.

ООО "Нефтегазгеофизика" готово предоставить заказчикам услуги по исследованию ядерно-магнитным методом в искусственном магнитном поле (ЯМК-ИП) скважин диаметром от 160 до 290 мм с пресными и солеными буровыми растворами, температурой до 175 °C и давлением до 120 МПа.

Таблица

	ЯМТК-145	ЯМТК-145-Т	ЯМТК-120-Т
Эксплуатационные характеристики			
1. Максимальная температура, °С	125	175	175
2. Максимальное давление, МПа	80	120	120
3. Максимальный диаметр прибора, мм без отклонителей с отклонителями	145 165	152 170	120 134
4. Длина прибора, м	7,2	10,8	10,0
5. Масса прибора в собранном виде, кг	258	420	350
Технические характеристики			
1. Постоянное магнитное поле, Гс	175	168	148
2. Радиочастотное поле, Гс	0,6	0,6	0,6
3. Частота, кГц	≈720	≈710	≈630
4. Минимальное время раздвижки T_e , мс	0,8–1,2	0,8–1,2	0,8–1,2
5. Число эхо	до 1000	до 1000	до 1000
6. Скорость каротажа, м/ч	100	100	100
Показатели назначения			
1. Диапазон измерения амплитуды сигнала, %	1–100	1–100	1–100
2. Чувствительность, %	1	1	1
3. Диапазон измерения времени поперечной релаксации T_2 , мс	1–3000	1–3000	1–3000
4. Вертикальное разрешение, мм	620	620	620
5. Диаметр зоны исследования, мм	360	340	280
6. Толщина зоны исследования, мм	0,5–1	0,5–1	0,5–1

ЛИТЕРАТУРА

- Первый российский прибор ядерно-магнитного каротажа с использованием поля постоянных магнитов / Е. М. Митюшин, В. Ю. Барляев, В. А. Мурцовкин, Р. Т. Хаматдинов // Геофизика. 2002. № 1. С. 43–50.

2. Ядерно-магнитный томографический каротаж / Р. Т. Хаматдинов, Е. М. Митюшин, В. Ю. Барляев, В. А. Мурцовкин, А. В. Малинин // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2002. Вып. 100. С. 138–169.
3. Пат. 2181901 РФ. Способ каротажа с использованием ядерно-магнитного резонанса и устройство для его осуществления / Митюшин Е. М., Барляев В. Ю., Хаматдинов Р. Т. 2002.
4. Малинин А. В. О некоторых возможностях ядерно-магнитного каротажа при геолого-техническом моделировании // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2004. Вып. 116–117. С. 23–43.
5. Khamatdinov R., Mityushin E., Murtsovkin V., Tiller D., Jonkers J. 2003, Fild Test of a New Nuclear Magnetic Resonance Tool:Paper AAA. SPWLA 44 Annual Logging Symposium.

УДК 550.832.582

B. A. Мурцовкин, A. C. Зеленов
ООО "Нефтегазгеофизика"

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО КАРОТАЖА

В работе представлены результаты, указывающие, что данные ядерно-магнитного каротажа (ЯМК) могут быть использованы не только для оценки проницаемости горных пород, но также и для расчета их электропроводности. В основе предлагаемого подхода лежит капиллярно-решеточная модель порового пространства. Показано, что совместное использование данных ЯМК с результатами электрического каротажа позволяет выделять пласти, содержащие углеводороды.

Одним из достоинств метода ЯМК при изучении свойств горных пород является возможность получения информации о распределении пористости по размерам пор. Это позволяет не только определять общую пористость пород, но и разложить ее на компоненты: микропористость глин, пористость, заполненную капиллярно-связанной водой, и пористость со свободным флюидом (с выделением каверновой составляющей) [1, 2].