

УДК 550.832.582

*С. С. Сошин, Р. Т. Хаматдинов, В. Ю. Барляев,
А. В. Малинин, А. С. Зеленов, Ю. Л. Иванов*
ООО «Нефтегазгеофизика»

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО КАРОТАЖА СИЛЬНОГО ПОЛЯ. СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ

Описываются основные этапы формирования отечественной технологии ядерно-магнитного каротажа в сильном поле (ЯМТК), современное состояние и развиваемые перспективные направления.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, приборы ядерно-магнитного каротажа, ядерно-магнитный каротаж.

2 февраля 2001 г. в Оренбургской области было проведено исследование скважины первым отечественным прибором ядерно-магнитного каротажа (ЯМК) в сильном поле, разработанным и созданным в г. Твери по оригинальной технологии, названной «ядерно-магнитный томографический каротаж» (ЯМТК) [5, 13, 14]. На тот момент на мировом рынке геофизических услуг для исследований скважин методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в сильном поле присутствовали только два типа приборов: MRIL фирмы Halliburton и CMR фирмы Schlumberger. Несколько позже на рынок вышла компания Baker Hughes с прибором MREX.

Разработка вышеуказанной технологии началась в г. Твери в ОАО НПЦ «Тверьгеофизика» в конце 1990-х годов по инициативе и под руководством доктора технических наук Р. Т. Хаматдинова (впоследствии основателя и генерального директора ООО «Нефтегазгеофизика»). Рафис Такиевич сформировал группу специалистов во главе с доктором технических наук Е. М. Митюшиным, которые в короткие сроки уже к 2000 г. сумели создать действующий макет устройства. В группу вошли такие первоклассные специалисты, как В. Ю. Барляев, В. В. Барташевич и В. К. Громцев. Позже, уже в ООО «Нефтегазгеофизика», на основе этой группы был создан отдел ядерно-магнитного каротажа. После получения первых результатов к группе присоединились методисты во главе с доктором физико-математических наук В. А. Мурцовкиным, обеспечившие физико-математическую часть

методологии обработки сигналов ядерного магнитного резонанса, и геолог, кандидат технических наук А. В. Малинин, организовавший службу по обработке и комплексной интерпретации данных ядерно-магнитного каротажа. К настоящему времени технология ЯМТК охватывает сложную динамичную систему производственных операций и процессов, включающих физико-математическое моделирование, разработку программного обеспечения и электронных подсистем аппаратуры, конструирование, метрологическое обеспечение, сервисные работы на скважинах и геологическую интерпретацию геофизических данных. Технология ЯМТК защищена патентами [8, 9] Российской Федерации, патентами США, Канады и ряда европейских стран [15–18]; программно-методический комплекс технологии зарегистрирован Роспатентом [11]; аппаратура сертифицирована для применения в производстве геофизических исследований и работ в скважинах.

Первой реализацией технологии ЯМТК стали центрированные кабельные приборы [8]. Системный подход к разработке аппаратуры с применением современных методов физико-математического моделирования, оригинальные конструкторские и электротехнические решения обеспечили оптимальное соотношение между элементами прибора, в частности зондового устройства (рис. 1), что позволило создать аппаратуру, работоспособную в широких диапазонах условий эксплуатации. Центрированные приборы пригодны к исследованиям в скважинах, заполненных высокоминерализованным буровым раствором с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) до $0,04 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, при температурах до 150°C и давлением до 120 МПа . Удовлетворительный размер зоны исследования допускает применение аппаратуры в скважинах диаметром до $\approx 260 \text{ мм}$.

На рис. 1 представлена модель распределения сигнала в зоне исследования, которая является участком области ядерного магнитного резонанса, ограниченной специально сформированным радиочастотным полем, генерируемым мультипольной системой токов. Область резонанса формируется полем постоянного магнита.

В качестве примера на рис. 2 приведен участок планшета с результатами работы прибора в сложных условиях при температуре 150°C в высокоминерализованном растворе с УЭС $0,04 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в скважине малого диаметра. На диаграмме четко выделяются три карбонатных тела, разделенные плотными перемычками аргиллитов. Зарегистрированная пористость в перспективных прослоях различается и со-

ставляет от 7 до 18%. Основная их особенность – протяженные релаксационные кривые и, соответственно, значительные максимальные времена спектров поперечной релаксации (более 1000 мс), что может свидетельствовать о присутствии легких фракций газированной нефти.

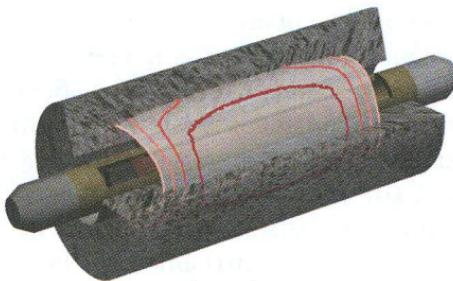


Рис. 1. Зондовое устройство центрированного прибора в скважине

На следующей стадии развития технологии в эксплуатацию были введены приборы прижимной конфигурации [9], в которых радиочастотные поля формируются в основном в относительно узком секторе, а прижимное устройство обеспечивает постоянное примыкание зондовой установки этим сектором к стенке скважины. В результате радиочастотные поля практически полностью оказываются внутри породы (рис. 3), что устраняет негативные эффекты, обусловленные «захватом» бурового раствора зоной исследования, и смягчает требования к степени минерализации буровых растворов. Этот класс аппаратуры ориентирован на скважины большого диаметра, вплоть до 500 мм, с УЭС раствора до 0,02 Ом · м.

Центрированный и прижимной варианты технологии ЯМТК дополняют друг друга, обеспечивая широкий охват объектов исследований. Однако расширение модельного ряда приборов ЯМТК, а также объемов и географии сервисных работ по ЯМК привело к росту производственных и логистических издержек, что поставило перед компанией задачу по оптимизации измерительной системы. Проблема была решена внедрением модульной архитектуры в компоновку прибора. В настоящее время приборы ядерного магнитного каротажа комбинируются из отдельных унифицированных элементов – модулей, оптимизированных к исследованиям в скважинах различного диаметра, солености и степени наклонности. Это позволило умень-

шить издержки при проведении работ, увеличить эксплуатационный ресурс аппаратуры и одновременно обеспечить заказчика всем спектром инструментов ЯМК, в том числе в труднодоступных регионах. В целом в различных своих вариантах аппаратура ядерно-магнитного каротажа производства ООО «Нефтегазгеофизика» нашла широкое применение в большинстве нефтегазоносных провинций России – от Калининграда до Камчатки, в ближнем и дальнем зарубежье, на месторождениях Северной и Южной Америки, Африки, Ближнего Востока. Ниже подробно описаны два варианта компоновки приборов ЯМТК, предназначенные для исследований в наклонно-направленных скважинах и в скважинах малого диаметра.

Переход на бурение скважин малого диаметра (СМД) [12] является одним из методов сокращения операционных и капитальных затрат при строительстве скважин. Так, в компании «ЛУКОЙЛ», где бурение скважин малого диаметра применяют, в частности, для вовлечения в разработку остаточных извлекаемых запасов нефти, уменьшение диаметров обсадных колонн и применение мобильных буровых установок малой грузоподъемности снизило стоимость строительства скважин на 25% [4].

Однако выполнение ГИС методом ядерного магнитного резонанса на таких объектах до недавнего времени не представлялось возможным из-за большого диаметра соответствующей скважинной аппаратуры. Это обусловлено сложностью формирования необходимых конфигураций статических и радиочастотных полей источниками, скомпонованными в малых объемах, и обеспечения требуемого качества принимаемого сигнала. С применением современных технологий и методов физико-математического моделирования удалось создать и ввести в эксплуатацию аппаратуру малого диаметра (108 мм) для скважин с диаметром открытого ствола 137 мм и более в соответствии с требованиями РД 153-39.0-072-01 [10]. Эффективность разработки подтверждена десятками успешных исследований. Примером регистрации данных в СМД является рис. 2, где приведены результаты обработки каротажа в скважине с диаметром открытого ствола 139 мм, выполненного, как описано выше, в высокоминерализованном растворе при температуре 150 °С. В настоящее время в строй вводится самая тонкая в мире на текущий момент аппаратура ЯМТК диаметром 90 мм, предназначенная для работ на объектах с минимальным диаметром открытого ствола 115 мм.

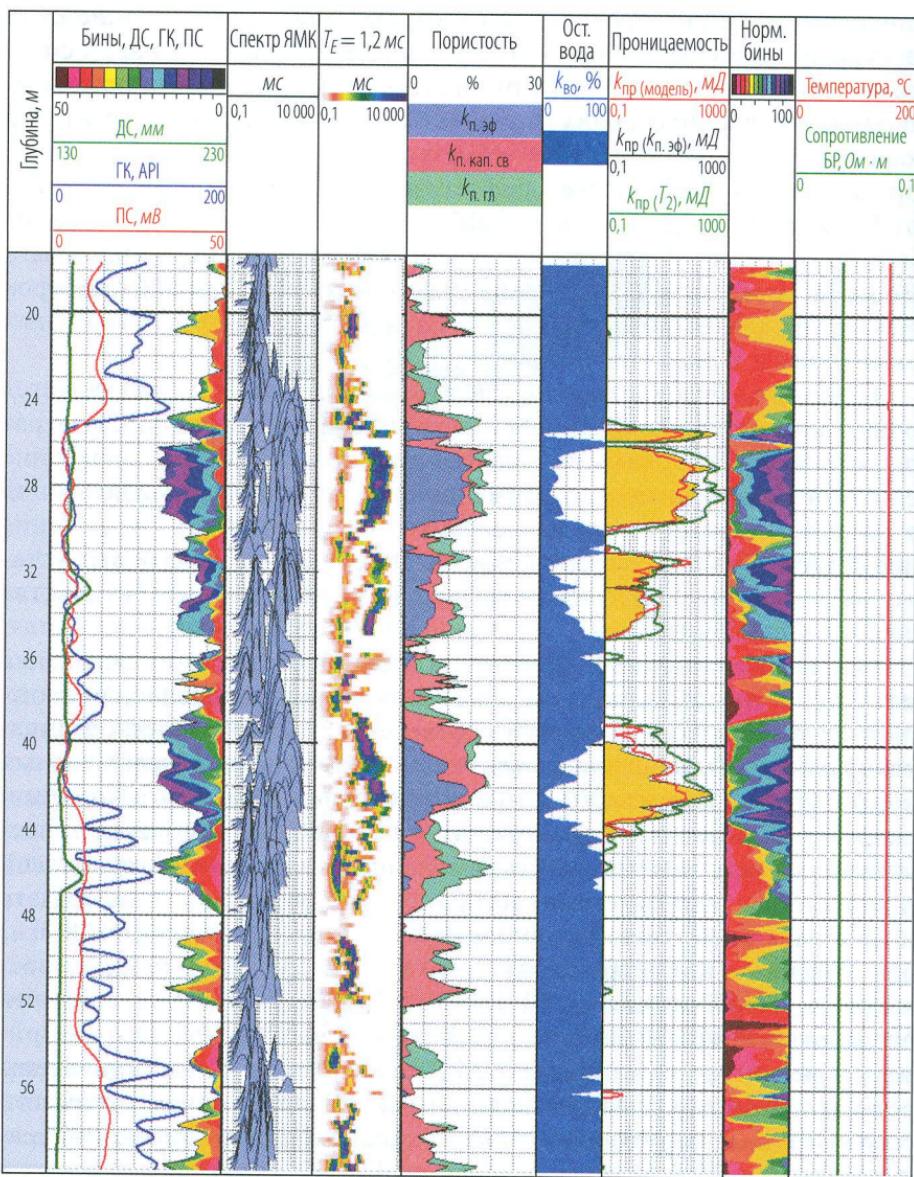


Рис. 2. Планшет с результатами каротажа центрированным прибором ЯМТК в глубокой высокотемпературной скважине (150 °C) с УЭС раствором 0,04 Ом · м; отложения нижнего триаса

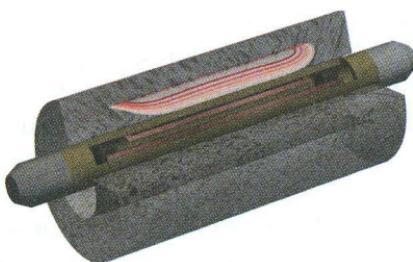


Рис. 3. Зондовое устройство прижимного прибора в скважине

Другим направлением развития технологии ЯМТК являются исследования в наклонно-направленных скважинах. Рост объемов наклонно-направленного бурения с углами отклонения ствола скважин от вертикали более чем на 30° , в том числе горизонтальных, потребовал разработки аппаратуры, совместимой со специальными методами доставки скважинных приборов в интервал исследований, основным из которых является доставка с помощью бурового инструмента. Такая измерительная система может быть реализована двумя путями: во-первых, посредством применения так называемого «мокрого контакта», обеспечивающего электрическую связь геофизического прибора с каротажным кабелем и сопряжение последнего с инструментом, во-вторых – через применение бескабельных автономных измерительных систем. Последний подход реализован в автономной компоновке приборов ЯМТК (рис. 4), питание которой осуществляется батарейной сборкой, поддерживающей непрерывное функционирование аппаратурой на протяжении не менее 10 часов. Управление измерительным процессом осуществляется специальным модулем, ответственным за регистрацию данных, их накопление и автоматическое тестирование аппаратуры во время исследования. Качество геофизических данных, регистрируемых в автономной компоновке, и объем решаемых геологических задач полностью эквивалентны таковым для кабельного варианта. На рис. 5 представлен планшет с результатами каротажа автономной компоновкой. Дополнительно на планшете для продуктивных пластов-коллекторов нанесены в виде 2D-карт результаты регистрации двумерных ЯМР-исследований в координатах $T_2 - D$ (время поперечной релаксации – коэффициент диффузии). Выделенные пласти сложены мощным алевропесчанным телом, осложненным карбонатизированными прослоями.

По ЯМК в отдельных прослоях отмечаются признаки присутствия «живой», газированной нефти, зарегистрированы также аномалии остаточной нефти. 2D-карты не только подтверждают характер насыщения этих прослоев, но также предоставляют дополнительную информацию о вязкости флюида (его коэффициенте диффузии), находящегося в зоне исследования.

Отсутствие кабеля и доставка аппаратуры на инструменте не только открывают для метода новые объемы на рынке ГИС, но и снижают риски возникновения аварийных ситуаций при исследованиях на сложных, в том числе вертикальных, объектах, отягощенных потенциальной возможностью различных геологических осложнений.

В то же время аппаратура ЯМТК не исключает применения метода «мокрого контакта». С этой целью компоновка кабельных приборов была доработана до совместимости с некоторыми вариантами российских реализаций такого способа доставки аппаратуры.

В компоновку приборов ЯМТК могут входить модули гамма-мето-

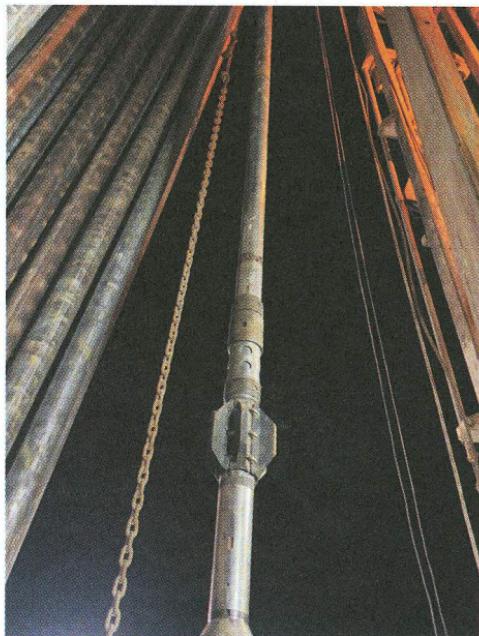


Рис. 4. Автономный прибор ЯМТК на спуске в скважину

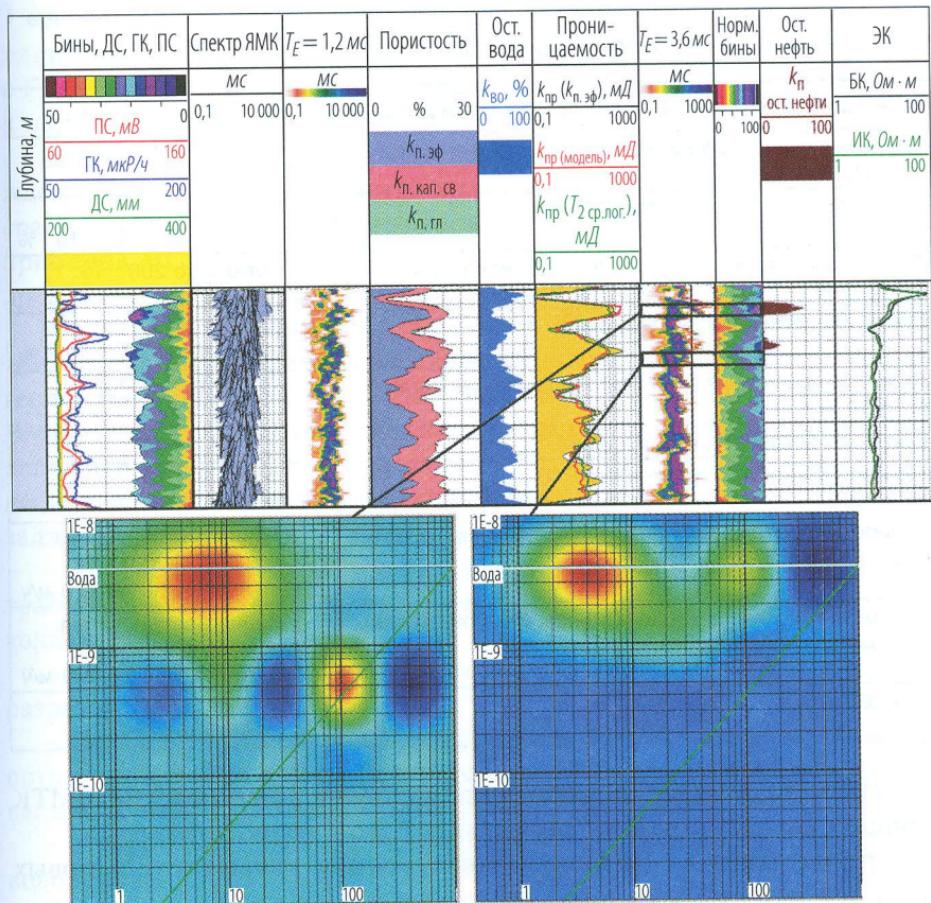


Рис. 5. Применение автономной компоновки прибора ЯМТК. Разрез неокома, пласти группы Б; регистрации 2D-карт в продуктивных пластах-коллекторах. На врезках – результаты двухмерных ЯМР-исследований в продуктивных пластах-коллекторах в виде распределения пористости в координатах T_2 (ось абсцисс), D – диффузия (ось ординат)

дов ГК или СГК. Модули являются полноценными геофизическими приборами, характеристики СГК приведены в табл. 1. Применение СГК в связке с прибором ЯМК позволяет эффективно использовать сравнительно малую относительно других методов ГИС скорость ядерно-магнитного каротажа и обеспечивать высокое качество данных СГК.

Таблица 1

Характеристики модуля СГК

Технические данные и основные параметры	Значения параметра
Диапазон измерения массового содержания тория (THOR), %	от 0,3 до $200 \cdot 10^{-4}$
Основная погрешность измерения, %	$\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$, 10% при THOR > $15 \cdot 10^{-4}$ %
Диапазон измерения массового содержания урана (URAN), %	от 0,3 до $200 \cdot 10^{-4}$
Основная погрешность измерения, %	$\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$, 10% при URAN > $15 \cdot 10^{-4}$ %
Диапазон измерения массового содержания калия (РОТА), %	от 0,2 до 20
Основная погрешность измерения, %	0,3
Чувствительность, (имп/мин)/(мкР/ч), не менее	1500
Скорость каротажа в активном (терригенном) разрезе ($J_{ГК} > 4-5 \text{ мк/ч}$), м/ч	Общие исследования: от 140 до 180 м/ч; детальные: от 80 до 120 м/ч
Скорость каротажа в низкоактивном (карбонатном) разрезе ($J_{ГК} < 4-5 \text{ мкР/ч}$), м/ч	Общие исследования: от 140 до 150 м/ч; детальные: от 60 до 100 м/ч
Тип детектора	Csl(Na) сцинтилляционный

ГИС методом ядерно-магнитного каротажа по технологии ЯМТК в общем случае позволяет определять следующие параметры:

- регистрация в скважине релаксационных кривых от пластовых флюидов методом ядерного магнитного резонанса;
- вычисление спектров пластовых флюидов;
- вычисление двумерных распределений пористости по (T_2 , T_1) и (T_2 , D).
- определение общей и эффективной пористостей, абсолютной проницаемости в поточечном режиме;
- исследование строения и цикличности формирования разрезов;
- выделение коллекторов с оценкой фильтрационной неоднородности;
- выделение интервалов с присутствием потенциально подвижной нефти в зоне исследования ЯМК на независимой от электрического каротажа физической основе.

Ограничения ЯМК, связанные с наличием в пластах газа или тяжелых нефтей (битума), достаточно надежно снимаются в комплексе с ГИС ЭК и РК, позволяя оценивать содержание битуминоидов [14] и параметры газонасыщенных пластов [3].

Единство измерений достигается метрологическим сопровождением аппаратуры, которое включает в себя как испытания на сравнение измеряемых параметров с эталонными, так и аттестацию приборов по соответствуанию измеряемых параметров теоретическим представлениям ядерного магнитного резонанса [1, 6].

Результаты применения технологии ЯМТК подтверждены опытом исследований на сотнях скважин, выполненных в различных геологических условиях. Обширная база данных по применению ЯМК в совокупности с оригинальными интерпретационными моделями и методиками, в частности [2, 7], позволяют в процессе исследований дать надежные количественные решения следующих задач:

- определение по всему интервалу каротажа комплекса фильтрационно-емкостных свойств разреза и на этой основе выделение коллекторов;

- изучение геологического строения и цикличности формирования разреза;

- выделение интервалов с присутствием потенциально подвижной остаточной нефти в зоне исследования ЯМК на основе отличия по величине вязкости от воды (фильтрата);

- определение насыщенности породы различными видами углеводородов.

Результаты ЯМК рекомендованы к использованию Методическими рекомендациями по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом, согласованными с ГКЗ МПР России.

В целом можно сказать, что технология ЯМТК представляет собой полную систему методов и инструментов для решения задач разведочной и промысловой углеводородной геофизики методом ядерного магнитного резонанса. Технология востребована на практике и динамично развивается в соответствии с запросами рынка геофизических услуг. Основные характеристики различных компоновок приборов ЯМТК приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики приборов ЯМТК
 (через косую черту указаны варианты для разных компоновок)

Характеристики \ Компоновка	Кабельная, центрируемая	Кабельная, прижимная	Автономная
Максимальная температура, °C	120/150	120/150	110
Максимальное давление, МПа	120	120	120
Диаметр открытого ствола, мм	от 137 до 260	от 190 до 500	от 132 до 260
Максимальный диаметр, мм	108/126/155	155	108/126/155
Частота, кГц	≈ 600	≈ 600	≈ 600
Градиент в зоне исследования, Гс/см	20	20	20
Минимальное время раздвижки, T_E , мс	0,7	0,7	0,7
Количество эх	до 1000	до 1000	до 1000
Скорость каротажа, м/ч	от 80 до 150	от 80 до 150	от 80 до 150
Погрешность измерения пористости, %	2	3	2
Вертикальное разрешение, мм	620	620	620
Сопротивление бурового раствора, Ом · м	> 0,04	> 0,02	> 0,06

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленов А. С., Сошин С. С., Тарасов С. Ю. Метрологическое обеспечение аппаратуры ядерно-магнитного каротажа в искусственном магнитном поле // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2019. Вып. 2 (296). С. 45–57.
2. Малинин А. В. О некоторых возможностях ядерно-магнитного каротажа при геолого-техническом моделировании // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2004. Вып. 3–4 (116–117). С. 23–43.
3. Малинин А. В., Тарасов С. Ю., Дубницкий И. Р. и др. Опыт применения ядерно-магнитного каротажа для изучения газовых залежей // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2019. Вып. 4 (298). С. 30–42.
4. Мещеряков К. А., Фефелов Ю. В. 10 лет бурения скважин малого диаметра // Деловой журнал Neftegaz.ru. 2020. № 3, 5. С. 43–44.
5. Митюшин Е. М., Барлыев В. Ю., Мурцовкин В. А., Хаматдинов Р. Т. Первый российский прибор ядерно-магнитного каротажа с использованием поля постоянных магнитов // Геофизика. 2002. № 1. С. 43–50.

6. Митюшин Е. М., Хаматдинов Р. Т., Громцев В. К., Сошин С. С. Состояние и развитие сильного поля ядерно-магнитного каротажа в ООО «Нефтегазгеофизика» // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып. 3 (225). С. 56–69.
7. Мурцовкин В. А. Использование мультирешеточной капиллярной модели для расчета проницаемости по данным ядерного магнитного резонанса // Коллоидный журнал. 2009. Т. 71. № 5. С. 685–692.
8. Патент № 2181901 РФ. Способ каротажа с использованием ядерно-магнитного резонанса и устройство для его осуществления / Митюшин Е. М., Барляев В. Ю., Хаматдинов Р. Т. 2002.
9. Патент № 2367982 РФ. Способ каротажа с использованием ядерно-магнитного резонанса и устройство для его осуществления / Митюшин Е. М., Сошин С. С., Хаматдинов Р. Т. 2009.
10. РД 153-39.0-072-01. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. М.: Изд-во ГЕРС, 2002. 272 с.
11. Свидетельство № 2003612705 об официальной регистрации программы для ЭВМ NMR Processor / Зеленов А. С., Мурцовкин В. А., Пантиухин В. А., Лобода Д. Р., Велижанин В. А., Тарасов С. Ю., Шеин Ю. Л. 2003.
12. Тахаутдинов Ш. Ф., Хисамов Р. С., Нуриев И. А. и др. Скважины малого диаметра: опыт бурения и эксплуатации, перспективы развития // Нефтяное хозяйство. 2009. № 7. С. 23–25.
13. Хаматдинов Р. Т., Митюшин Е. М., Барляев В. Ю., Мурцовкин В. А., Малинин А. В. Ядерно-магнитный томографический каротаж // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2002. Вып. 100. С. 138–169.
14. Khamatdinov R., Mityushin E., Murtsovkin V., Tiller D., Jonkers J. Field Test of a New Nuclear Magnetic Resonance Tool // SPWLA 44 Annual Logging Symposium, 2003. Paper AAA.
15. Mityushin E. M., Barlyaev V. J., Chamatinin R. T. Verfahren der Bohrlochmessung Mittels Kernmagnetischer Resonanz und Vorrichtung zur Verwirklichung des Verfahrens. 2015.
16. Patent US7075298. Method and Apparatus for Well Logging Using NMR with a Long Conductive Rare-Earth Magnet and Excitation Compensation in the Area of the Long Magnet / Mityushin E. M., Khamatdinov R. T., Barlyaev V. J. 2006.
17. Patent CA2432230. Method for Well Logging Using Nuclear Magnetic Resonance and Device for Carrying out Said Method / Mityushin E. M., Khamatdinov R. T., Barlyaev V. J. 2002.
18. Patent GB2387233. Method for Well Logging Using Nuclear Magnetic Resonance and Device for Carrying out Said Method / Mityushin E. M., Khamatdinov R. T., Barlyaev V. J. 2005.

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