

УДК 550.832

В. А. Истратов, С. О. Перекалин, И. К. Мазитова
ООО "Радионда"
А. И. Губина
Пермский ГНИУ
П. Н. Гуляев, Ю. В. Уточкин
ООО "ПИТЦ Геофизика"

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ КАРОТАЖА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА НАСЫЩЕНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ В УСЛОВИЯХ ЗАВОДНЕНИЯ ПРЕСНЫМИ ВОДАМИ, ПРИМЕНЕНИЯ ИНВЕРТНЫХ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ И СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБСАДНЫХ ТРУБ

Приведены примеры опробования комплекса электромагнитных методов "многозондовый индукционный каротаж – многочастотная диэлектрическая интроскопия" (МИК–MFDI) для определения характера насыщения коллекторов в условиях применения растворов на нефтяной основе, стеклопластиковой обсадки, эксплуатации скважины методом открытого забоя и пресноводного обводнения коллекторов. Показана эффективность комплекса и его преимущества по сравнению с другими методами определения характера насыщения.

Ключевые слова: многозондовый индукционный каротаж, многочастотная диэлектрическая интроскопия, насыщение коллекторов, относительная диэлектрическая проницаемость, инвертные буровые растворы, пресноводное заводнение, стеклопластиковая обсадка, электросопротивления.

Определение характера насыщения коллекторов является основой для оценки текущих запасов нефти. Наиболее просто эта задача решается в условиях открытого ствола скважины при его заполнении полимерсолевым раствором (или другим раствором с низким удельным сопротивлением) с использованием стандартного комплекса, включающего боковой каротаж, микробоковой каротаж и БКЗ. Однако в некоторых случаях, например, если пласты частично заполнены пресными водами или используется непроводящий раствор на нефтяной основе (ИЭБР, РИЭР и т. д.), или скважина обсажена стеклопластиковой колонной, стандартный комплекс дает неоднозначные результаты или вовсе неприменим.

В этих случаях оказывается эффективным комплексное применение таких новых отечественных разработок электромагнитных методов, как многозондовый индукционный каротаж (метод МИК с аппаратурой КарСар 5ИК-73П) и многочастотная диэлектрическая интроскопия (метод ДИ-МЧ с аппаратурой MFDI) [2].

Методы отличаются способом создания поля, рабочими частотами, размерами зондов, и каждый имеет свои преимущества и ограничения. Длина зонда в значительной мере определяет глубинность исследований (радиальный фактор), а частота – возможность определения диэлектрической проницаемости среды ϵ , влияние которой начинает проявляться при значениях выше 5 МГц. Диэлектрическая проницаемость является прямой и наиболее информативной физической характеристикой при определении характера насыщения коллекторов, так как пластовая вода характеризуется значениями 80 отн. ед., а нефть – 2–4 отн. ед. [3].

Объединение этих методов в единый измерительно-обрабатывающий комплекс предоставляет возможность, с одной стороны, обеспечить максимальную глубинность исследований (до 1,5–2,0 м), а с другой – изучать электрические свойства в широком диапазоне частот 0,1–50 МГц при разной (взаимно перпендикулярной) поляризации магнитного (ИК) и электрического (ДИ-МЧ) излучаемых полей. Поэтому отдельными задачами исследований таким комплексом становятся изучение частотной дисперсии и анизотропии электрических характеристик пластов.

При этом у методов МИК и ДИ-МЧ ограничены возможности в условиях низкоомных буровых растворов ($< 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), а у 5ИК еще и во вмещающих породах высокого электрического сопротивления ($> 300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Многозондовый индукционный каротаж и аппаратура КарСар 5ИК73

В приборе КарСар 5ИК73 используется 5 геометрически подобных трехкатушечных зондов, состоящих из генераторных, экранных и измерительных катушек, расположенных в непроводящем стеклопластиковом корпусе прибора. Генераторные катушки разнесены от приемной на 0,25; 0,5; 0,75; 1,25 и 2,00 м. Наличие нескольких зондов обеспечивает возможность радиального зондирования око-

лоскважинного пространства. Измерения выполняются на рабочей частоте 100 кГц.

В измерительной катушке регистрируются данные активных и реактивных компонент ЭДС. Результаты измерений пересчитываются в значения кажущейся проводимости среды (mCm/m).

При обработке в программном комплексе ПРАЙМ в измеренные величины вводятся поправки за следующие показатели:

- некорректный учет нуля проводимости;
- влияние скважины (диаметр, проводимость промывочной жидкости) с учетом положения зонда (на стенке скважины или по ее центру);
- скин-эффект;
- влияние вмещающих пород (без учета угла вскрытия пластов скважиной).

Результат обработки МИК – определение сопротивления неизменной части пласта и зоны проникновения, а также определение радиуса зоны проникновения.

Многочастотная диэлектрическая интроскопия и аппаратура ДИ-МЧ

Метод многочастотной диэлектрической интроскопии (MFDI) основан на зависимости поглощения электромагнитной энергии от электрических свойств пород в околоскважинном пространстве. Измерения электромагнитного поля проводятся на нескольких частотах в диапазоне 1,25–50 МГц. Источником гармонического сигнала является излучатель, нагруженный на осевую электрическую антенну. На некотором расстоянии L от излучающей антенны, называемом разнесом установки, располагается приемник с электрической антенной такой же конструкции. Измеряемой величиной является амплитуда сигнала на выходе приемной антенны.

Принимаемый сигнал E можно аппроксимировать полем электрического диполя [5]:

$$E = \frac{E_0}{2 \cdot \pi \cdot L^3} \cdot \frac{1 - i \cdot k \cdot L}{1/\rho - i \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon} \cdot e^{i \cdot k \cdot L}. \quad (1)$$

Волновое число

$$k = (i \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot (1/\rho - i \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon))^{0.5}, \quad \omega = 2\pi f, \quad (2)$$

где f – частота электромагнитного излучения, Гц; ρ – электрическое сопротивление среды, Ом·м; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9} \text{ Ф/м};$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м};$$

$E_0 = I \cdot l_{\text{п}} \cdot l_{\text{и}} \cdot 103 \cdot 10^{-6}$ – аппаратный коэффициент ($A \cdot м^2$), где I – ток в источнике (A); $l_{\text{п}}$, $l_{\text{и}}$ – эффективная длина соответственно приемного и излучающего диполя, м.

Аппаратура ДИ-МЧ представляет собой скважинную измерительную систему, состоящую из 4 зондов (рис. 1): большой зонд (4,5 м), малый зонд (2 м), градиент-зонд (измерение разностных параметров большого и малого зондов), микрозонд – скважинный излучатель, измеряемые параметры излучения которого определяются свойствами среды в ближней зоне.

Методика измерений обеспечивает детальность исследований околоскважинного пространства как по стволу скважины (дискретность непрерывных измерений – 0,1 м), так и в радиальном направлении – от 0,5 до 2,0 м.

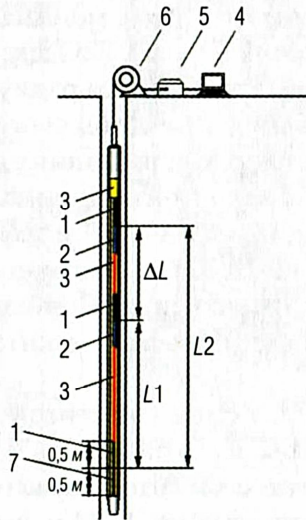


Рис. 1. Схема измерений ДИ-МЧ:

1 – антенна; 2 – скважинный приемник; 3 – блок оптической развязки; 4 – компьютер; 5 – ретранслятор; 6 – каротажный подъемник; 7 – излучатель

Вычисления эффективных значений ϵ и ρ проводятся итерационно методом подбора путем сравнения измеренного поля с расчетным, полученным по формуле (1). Подбор осуществляется на всех измеренных частотах одновременно путем минимизации функционала. Результаты измерений представляются в виде диаграмм частотных спектров по каждому из разносов и градиент-зонду и графиков эффективных значений ϵ и ρ .

По результатам комплексной обработки данных МИК и MFDI определяются радиальное распределение сопротивлений и влияние проникновения промывочной жидкости в пласт, а по значениям $\epsilon_{эф}$ и $\rho_{эф}$ – характер насыщения коллекторов. В перспективе комплекс позволит количественно оценивать влияние литологии и связанной воды на результаты измерений.

В качестве иллюстрации возможностей комплекса рассмотрим результаты, полученные в скважине, пробуренной на непроводящем буровом растворе типа ИЭР. Исследовались терригенные и карбонатные коллекторы.

На рис. 2 данные многозондового индукционного каротажа представлены в виде радиального распределения сопротивлений с увеличением длины зонда, максимального проникновения токов в водонасыщенных коллекторах (до 3,5 м), минимальное в непроницаемой части турнейских отложений (~ 1 м). По максимальному изменению сопротивления с глубиной определяется радиус зоны проникновения. Характерным понижающим или повышающим проникновением токов выделяются коллекторы, для глинистых пластов характерно повышающее проникновение. Стоит обратить внимание на то, что на глубинах ~1734,0; 1743,5; 1764,0; 1770,0 м зафиксированы аномально высокие значения поля по MFDI, характерные для плотных пород, а по МИК – высокие сопротивления. Возможно, в этих интервалах имеет место повышенная углистость, а в интервале 1762,9–1764,4 м залегает неколлектор.

По характеру изменения поля E с частотой по MFDI даже на качественном уровне коллекторы легко разделить по характеру насыщения. Более глубокий спад поля E с частотой характерен для водонасыщенных коллекторов (терригенная часть 1780 м, карбонатная – 1820 м). По результатам исследования данной скважины комплексом МИК-MFDI было рекомендовано провести опробование интервала 1791–1793 м в пласте Т1, в котором ВНК не был установлен.

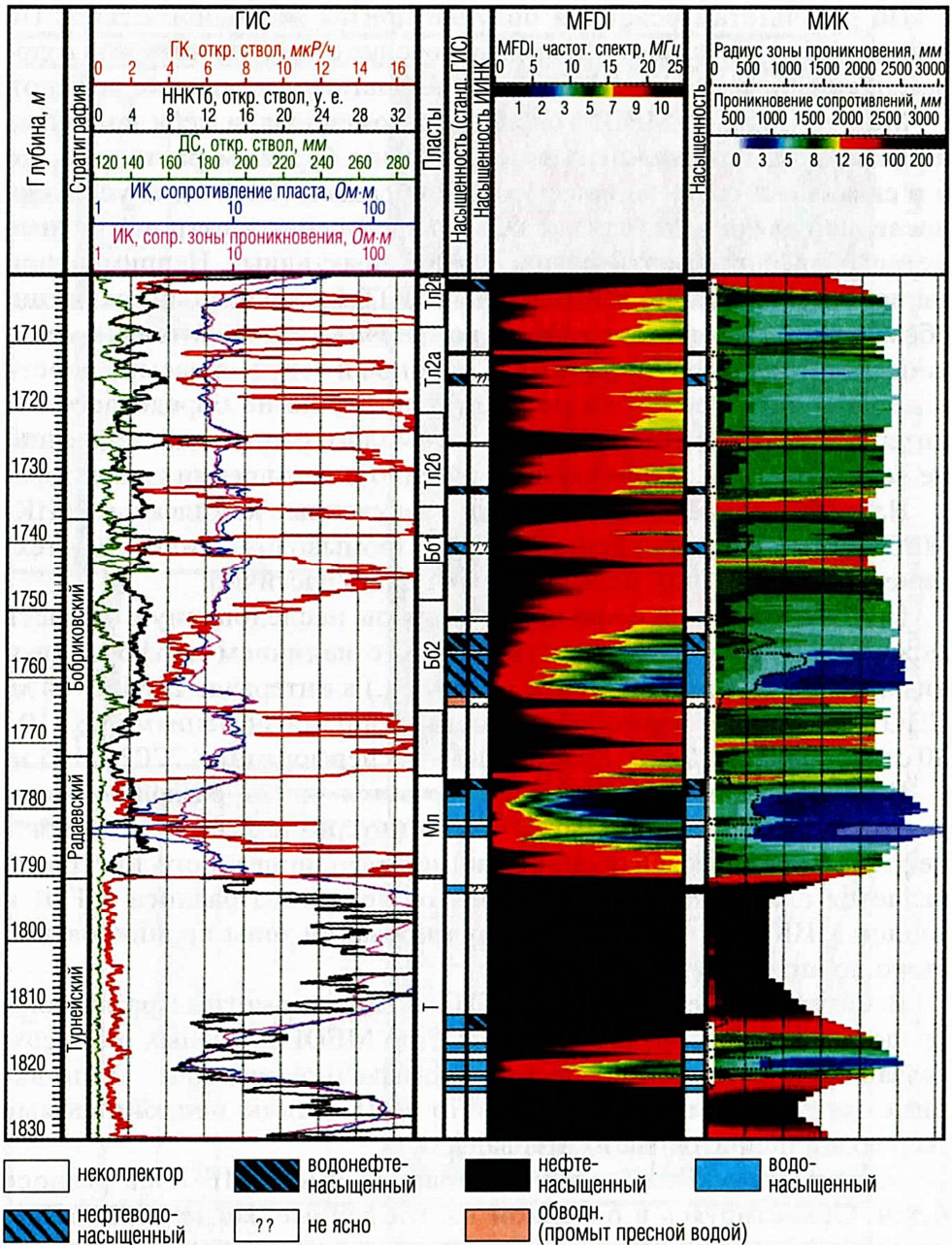


Рис. 2. Терригенные и карбонатные отложения, промывочная жидкость на нефтяной основе (ИЭР) (Аспинское месторождение)

По результатам освоения получен приток безводной нефти. По стандартному комплексу выдано заключение о том, что интервал водонасыщенный, запись ИННК не дала результата (насыщение не ясно).

Методы МИК и MFDI хорошо зарекомендовали себя не только в скважинах, заполненных непроводящим буровым раствором, но и в скважинах со стеклопластиковой обсадкой (СПОТ). В условиях последней для определения характера насыщения электромагнитные методы более предпочтительны, чем радиоактивные. Например, при записи метода ИННК в интервале СПОТ (относительно скважин, обсаженных стальными трубами) регистрируется значительно меньший счет импульсов вторичных нейтронов и текущая насыщенность пластов-коллекторов этим методом однозначно не определяется. В интервалах перфорации ИННК за счет малого радиуса исследований не всегда дает объективную информацию о насыщении коллектора.

На рис. 3 приведены результаты, полученные комплексом МИК-MFDI в скважине, обсаженной СПОТ. Промывочная жидкость – техническая вода, СПОТ перфорирована лишь частично.

При анализе полученных результатов исследованную область можно разделить на три части: СПОТ с наличием перфорации и низкими значениями $\epsilon_{\text{эф}}$ (ниже 10 отн. ед.) в интервале 2164–2184 м, СПОТ с наличием перфорации и повышенными значениями $\epsilon_{\text{эф}}$ (10–30 отн. ед.) – 2184,0–2202,0 м и СПОТ без перфорации – 2202–2135 м.

В неперфорированной части отмечается четкое разделение коллекторов по насыщению, коллектор в интервале 2204,0–2204,8 м – нефтенасыщенный. Особенностью неперфорированного интервала является слабая зависимость поля от величины разноса MFDI и зондов МИК, что говорит о расформировании зоны проникновения (хорошо видно по МИК).

В интервале перфорации СПОТ имеются заметные различия в представлении распределения поля E по MFDI на разных разносах, связанные с глубиной внедрения промывочной жидкости и, по-видимому, с разным насыщением. По МИК видны непроницаемые (вероятно, неприточные) интервалы.

Максимальную глубину исследования имеет MFDI на разносе 4,5 м. Ориентируясь в основном на эти данные, коллекторы разделены на нефтенасыщенные и частично промытые нефтенасыщенные с содержанием воды закачки, в том числе в коллекторы проникла и вода из скважины; граница прослеживается на глубине 2184,0 м.

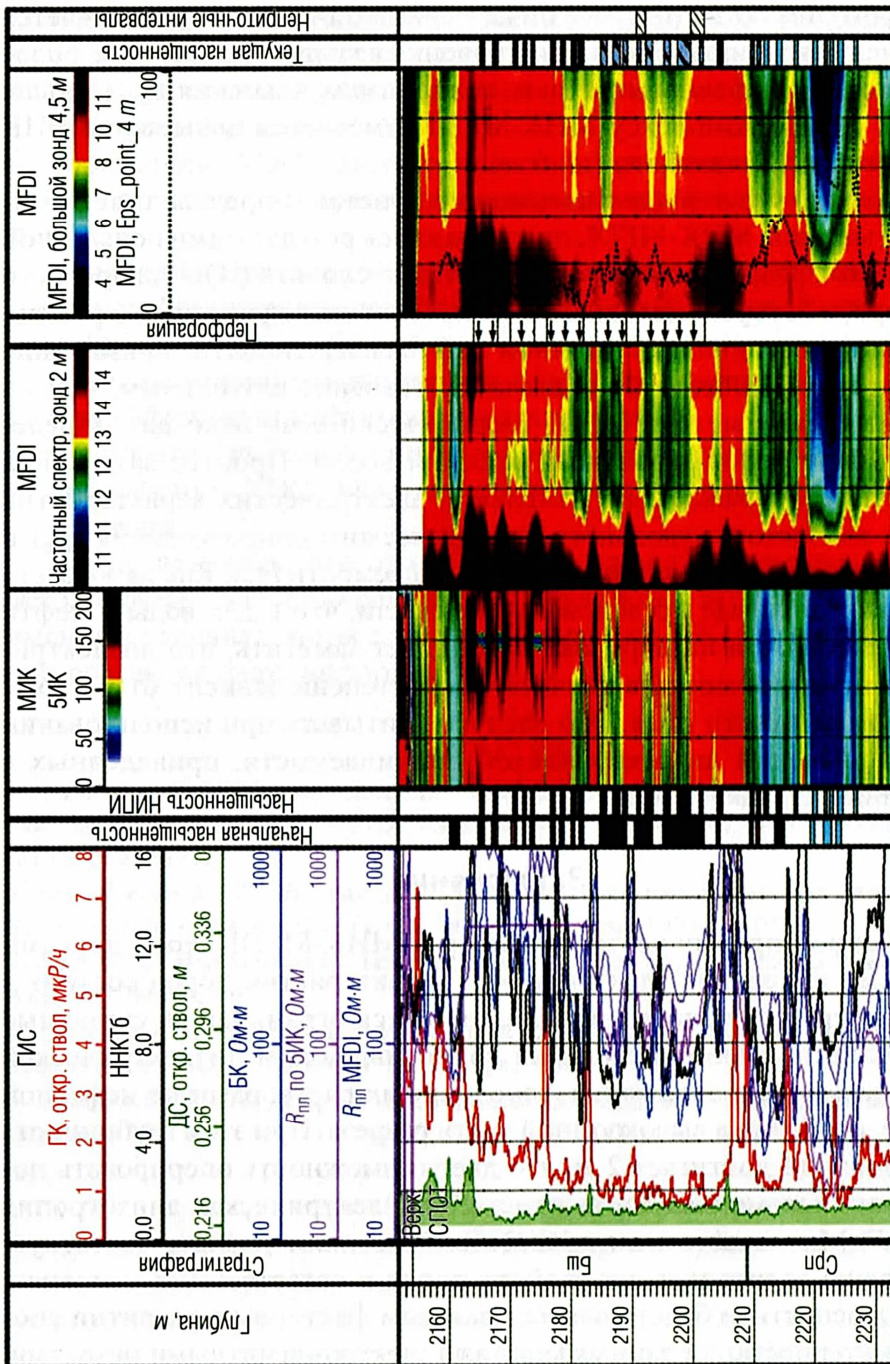


Рис. 3. Исследования скважины со стеклопластиковой обсадкой (СПОТ) методами МИК и МФДИ (Сибирское месторождение)

Необходимо отметить, что ниже этой глубины по МИК отмечается увеличение глубины зоны проникновения и коллекторы по ГИС более пористые. В нефтенасыщенных коллекторах значения $\epsilon_{\text{ф}}$ меньше 10 отн. ед. По комплексу МИК-MFDI отмечается повышение ВНК относительно начального (на 6 м).

Отметим, что текущее насыщение пластов, определенное комплексом методов МИК-MFDI, подтвердилось результатами испытаний.

В целом, результаты показывают, что в условиях СПОТ и пресного раствора, в которых методы ИННК и ИК не дают уверенного результата по определению остаточной нефтенасыщенности, применение диэлектрических методов становится особенно актуальным.

Применение метода MFDI теоретически возможно для определения коллекторов, промытых пресной водой. Процесс замещения нефти водой отражается в изменении электрических характеристик пласта-коллектора: удельного электрического сопротивления (ρ_n) и относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_n). Как лабораторные, так и полевые исследования показали, что ϵ для воды и нефти отличается почти на порядок [4]. Следует заметить, что диэлектрическая проницаемость в значительной степени зависит от частоты электромагнитного поля. Это следует учитывать при использовании таблиц значений диэлектрической проницаемости, приведенных в различных справочниках.

Заключение

Основное преимущество комплекса МИК-MFDI перед другими методами измерения электрических характеристик пород состоит в том, что при его использовании снимаются ограничения, связанные с невозможностью определения сопротивления и диэлектрической проницаемости в скважинах, заполненных растворами на нефтяной основе, особенно в высокоомной части разреза. При этом глубинность исследований достигает 2 м, что дает возможность оперировать понятиями “неизменная часть пласта” и “электрическая анизотропия пласта”. Многочастотные измерения позволяют изучать частотную дисперсию электрических свойств пород в естественных условиях, что в перспективе будет являться важным фактором в развитии способов интерпретации данных каротажа электромагнитными методами.

- В круг задач, решаемых комплексом методов МИК–MFDI, входят:
- выделение электрически однородных пластов и пластов с зоной проникновения, определение вида проникновения и радиуса зоны проникновения;
 - определение УЭС и диэлектрической проницаемости неизменной части пласта и промытой зоны, а также глубины зоны проникновения;
 - мониторинг процесса заводнения: выделение коллекторов, промытых слабоминерализованной водой (условно пресной, высокоомной);
 - выделение проницаемых интервалов, оценка характера насыщения и коэффициента нефтегазонасыщенности;
 - расчет электрической анизотропии (определение продольного и поперечного УЭС) неизменной части пласта при любых углах скважины.

Важно отметить, что применение комплекса электромагнитных методов МИК–MFDI для решения всех указанных задач целесообразно именно в условиях, когда стандартные методы ГИС малоэффективны или совсем не дают информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксельрод С. М. Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати) // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2012. Вып. 4 (214). С. 78–112.
2. Бондаренко М. Т., Лихачев В. В. Геологическая интерпретация данных диэлектрического каротажа // Геология нефти и газа. 1991. № 05.
3. Даев Д. С. Высокочастотные электромагнитные методы исследования скважин. М.: Недра, 1974.
4. Денисов С. Б. Высокочастотные электромагнитные методы исследования нефтяных и газовых скважин. М.: Недра, 1986.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. Издание 7-е, исправленное. М.: Наука, 1988.

*Рукопись статьи рассмотрена на заседании
кафедры геофизики ПГНИУ и рекомендована к публикации*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Н. С. Березовский

Зам. гл. редактора,
научный редактор
Ю. И. Кузнецов, д. г.-м. н., проф.

Отв. редактор С. В. Ларева

Редактор И. В. Шункова

Члены редакционной коллегии:

Б. С. Асланов, д. г.-м. н., проф.
(Азербайджан)

Ю. Н. Бармаков, д. т. н., проф.

Я. Н. Басин, д. т. н., проф. (США)

А. М. Блюменцев, д. т. н., проф.

Р. А. Валиуллин, д. т. н., проф.

В. А. Велижанин, к. т. н.

И. Н. Гайворонский, д. т. н., проф.

С. А. Дудаев, д. т. н.

Ф. Х. Еникеева, д. т. н.

В. Ю. Зайченко, д. г.-м. н.

В. И. Иванников, д. т. н., проф.

Л. Е. Кнеллер, д. т. н., проф.

Н. Г. Козыряцкий, к. т. н.

В. Ф. Козяр, д. т. н., проф.

А. К. Конысов, д. т. н. (Казахстан)

М. Д. Красножон, д. геол. н.

(Украина)

А. А. Кременецкий, д. г.-м. н., проф.

О. Л. Кузнецов, д. т. н., проф.

Э. Е. Лукьянов, д. т. н.

А. В. Малинин, к. т. н.

А. А. Молчанов, д. т. н., проф.

Т. Н. Нестерова, к. т. н.

Г. А. Павленко, к. т. н.

В. Д. Порошин, д. г.-м. н. (Беларусь)

В. А. Трофимов, д. г.-м. н., проф.

В. Г. Фоменко, д. г.-м. н., проф.

Р. Т. Хаматдинов, д. т. н., проф.

А. В. Шумилов, к. т. н., доц.

М. И. Эпов, д. т. н., проф.,

академик РАН

Учредитель: Ассоциация "АИС"

РФ, 170041, г. Тверь,

ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 17, корп. 1
Лицензия ЛР № 030838 от 29 июня 1998 г.

Свидетельство ПИ № 77-36891
от 20 июля 2009 г., выдано Роскомнадзором
Индекс Роспечати – 82015. ISSN 1810-5599.

Подписано в печать 07.10.2015 г.

Дата выхода в свет 25.10.2015 г.

Формат 60/84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 12. Уч.-изд. л. 12.

Тираж 860 экз. Зак. № 9098.

Цена свободная.

Адрес издателя и редакции

НТВ "Каротажник": РФ, 170041, г. Тверь,
ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 17, корп. 1

Компьютерная верстка, макет

ООО Издательство "Триада":

170034, г. Тверь, пр-т Чайковского, д. 9,
офис 514

Отпечатано в ООО "Тверская

фабрика печати":

170006, г. Тверь, Беляковский пер., д. 46

© Ассоциация "АИС", 2015



Научно-технический вестник

(рецензируемое издание)

Год издания двадцать четвертый

КАРОТАЖНИК

Выпуск 10 (256)

Посвящен 65-летию

ПАО "Пермнефтегеофизика"

Ответственный за выпуск

д. т. н., проф. В. А. Гершанок

ТВЕРЬ
2015

В выпуске:

Коллективу ПАО “Пермнефтегеофизика” в честь 65-летия.....	3
<i>А. В. Шумилов.</i> Публичному акционерному обществу “Пермнефтегеофизика” – 65 лет!	4

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

<i>В. И. Луппов.</i> Литолого-петрофизическая характеристика и физические свойства карбонатных пород Сибирского нефтяного месторождения с различными типами структуры порового пространства.....	21
<i>А. В. Шумилов, И. В. Геник, Д. Ф. Низматуллин, Хоу Сюели.</i> Геофизические исследования скважин при разведке и добыче метана угольных пластов	32
<i>В. А. Истратов, С. О. Перекалин, И. К. Мазитова, А. И. Губина, П. Н. Гуляев, Ю. В. Уточкин.</i> Опыт использования комплекса электромагнитных методов каротажа для определения характера насыщения коллекторов в условиях заводнения пресными водами, применения инвертных буровых растворов и стеклопластиковых обсадных труб	44
<i>Д. В. Глушков, В. И. Костицын.</i> Влияние фактора времени на достоверность выделения нефтенасыщенных коллекторов по данным фотографирования керна в дневном и ультрафиолетовом свете.....	54
<i>О. Л. Сальникова.</i> Определение профиля и состава притока в эксплуатационных горизонтальных скважинах	65
<i>С. В. Белов, П. С. Дьяконова, Р. А. Дягилев, А. Д. Савич.</i> Применение сейсмоакустических методов при контроле гидроразрыва пласта.....	79