МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пермское отделение межрегиональной общественной организации
«ЕВРО-АЗИАТСКОЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РАЗВЕДОЧНОЙ И ПРОМЫСЛОВОЙ ГЕОФИЗИКИ

Сборник
научных трудов

Выпуск 2 (7)

Пермь 2019

УДК 550.832

А. И. Губина [1,3], И. К. Мазитова [2], П. Н. Гуляев [3]

[1] Пермский государственный национальный исследовательский университет. 614990,Россия,г.Пермь,ул.Букирева, 15; e-mail: geophysic@psu.ru;

[2] ООО «Радионда», г. Москва; e-mail: radionda@radionda.ru;

[3] ООО «ПИТЦ Геофизика». 614000, Россия, г. Пермь, ул. Петропавловская, 16а, офис 408; e-mail: pitc@pitc.ru

ОПЫТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕФТЕНАСЫЩЕННОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ ПО ДАННЫМ МНОГОЧАСТОТНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИНТРОСКОПИИ (MFDI) С УЧЕТОМ ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Аннотация. *Приведены примеры опытно-производственных работ ООО «ПИТЦ «Геофизика» по оценке эффективности разработанного ООО «Радионда» метода многочастотной диэлектрической интроскопии ДИМЧ (MFDI) для количественного определения коэффициента нефтенасыщенности коллекторов в условиях естественного залегания. Представлены результаты комплексной оценки эффективности метода на основе сравнения данных ДИМЧ на стадии окончательного каротажа с фактическими данными добычи из исследованных скважин.*

© Губина А. И., Мазитова И. К., П. Н. Гуляев, 2019

Ключевые слова: *многочастотная диэлектрическая интроскопия, насыщение коллекторов, относительная диэлектрическая проницаемость, инвертные буровые растворы, пресноводное заводнение, стеклопластиковая обсадная колонна.*

A. I. Gubina [1, 3], I. K. Mazitova [2], P. N. Gulyaev [3]
[1]Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia;
e-mail: geophysic@psu.ru;
[2]Radionda LLC, Moscow; e-mail: radionda@radionda.ru;
[3] PITC Geofizika Ltd., 16a Petropavlovskaya Str., Office 408,
Perm 614000, Russia; e-mail: pitc@pitc.ru

EXPERIENCE OF DETERMINING THE RESERVOIR OIL SATURATION BY MULTI-FREQUENCY DIELECTRIC INTROSCOPY (MFDI) DATA TAKING INTO ACCOUNT THE FREQUENCY DISPERSION OF ELECTRICAL PROPERTIES

Annotation. *The article provides examples of the research production work of Ltd. PITC Geofizika to assess the effectiveness of the DIMCh multi-frequency dielectric introscopy method (MFDI) developed by Radionda LLC for quantitative determination of the oil saturation coefficient of reservoirs under natural occurrence conditions. The results of a comprehensive assessment of the effectiveness of the method are presented based on a comparison of the DIMC data at the final logging stage with the actual production data from the studied wells.*
Keywords: *multi-frequency dielectric introscopy, reservoir saturation, relative permittivity, invert drilling fluids, freshwater flooding, fiberglass casing.*

Метод многочастотной диэлектрической интроскопии ДИМЧ (MFDI) основан на зависимости поглощения электромагнитной энергии от электрических свойств пород в околоскважинном пространстве [1]. Источником гармонического сигнала является автономный скважинный передатчик, нагруженный на осевую электрическую антенну. На некотором расстоянии Z от передатчика, называемым разносом установки, располагается скважинный приемник с электрической антенной такой же конструкции. Скважинный многочастотный диэлектрический интроскоп «ДИМЧ-2Z» (изготовитель ООО «Радионда») содержит два приемных устройства, расположенных на фиксированных расстояниях от излучателя – Z1 и Z2 (рис. 1).

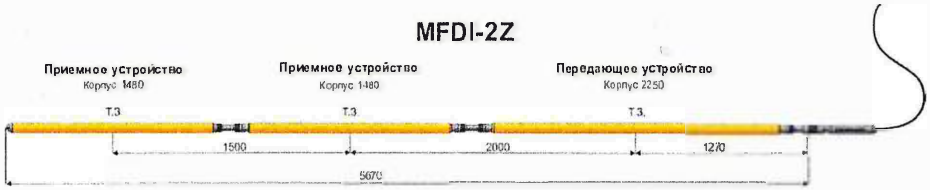

Рис. 1. Конструкция скважинной установки

Измерения электромагнитного поля дипольного источника проводятся на 50-ти частотах в диапазоне 1,25–50 МГц с шагом 1 МГц в режиме поточечной записи. Измеряемыми величинами являются: нормированные на излучаемый ток амплитуды сигнала на выходе каждой приемной антенны (A1, A2). На выходе излучателя установлен датчик, позволяющий регистрировать входное сопротивление и сдвиг фаз между током и напряжением на входе излучающей антенны, которые записываются и используются при обработке. Регистрируемые параметры излучения зависят от электрических свойств среды непосредственно в точке расположения излучающей антенны, поэтому скважинный излучатель является дополнительным «микрозондом». Во избежание прямых наводок от излучателя на приемники, связь между ними осуществляется по оптоволоконному каналу, а питание скважинных приборов обеспечивают автономные блоки аккумуляторов.

Измерительная установка с заданным шагом (обычно 0,5 м) перемещается по стволу скважины и на каждой точке (глубине) в течение 20 секунд проводятся измерения 250 параметров, которые по оптическому каналу через диэлектрическую развязку передаются по каротажному кабелю на поверхность, где регистрируются с помощью компьютера [2]. Обработка данных выполняется в сертифицированной программе MFDI Solver AD (RU 2018663774) [3] и позволяет изучать электрические свойства пород в естественном залегании.

Проведение измерений на 50 частотах обеспечивает возможность одновременного определения нескольких независимых параметров. Результатом первого этапа обработки является вычисление двух интерпретационных параметров $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$, которое осуществляется в автоматическом режиме одновременно на всех измеренных частотах путем минимизации функционала между теоретически рассчитанной частотной зависимостью поля и экспериментально измеренной. Влияние диэлектрической проницаемости среды на измеряемое поле начинает проявляться с 5 МГц и увеличивается с увеличением частоты поля, чем и определяется выбранный для измерений диапазон рабочих

частот. Существенным осложняющим фактором является явление частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных сред.

В новом пакете «MFDI Solver AD», предназначенном для обработки данных ДИМЧ, возможно использование различных графов обработки. Одна из ветвей программы предусматривает решение системы уравнений с одновременным определением электрического сопротивления пород, диэлектрической проницаемости и коэффициентов частотной дисперсии этих параметров, обусловленных структурой коллектора. По вычисленным коэффициентам дисперсии определяется показатель степени в уравнении Арчи, который далее используется для вычисления коэффициента водонасыщения коллекторов.

Таким образом, конечным интерпретационным параметром, определяемым с помощью MFDI, является коэффициент углеводородного насыщения коллекторов, а промежуточными параметрами: диэлектрическая проницаемость пласта, удельное сопротивление пласта, коэффициенты частотной дисперсии и показатель степени в уравнении Арчи.

При необходимости количественного учета изменения диаметра скважины, обработка проводится по алгоритму двуслойной среды с привлечением данных кавернометрии. Контроль и учет изменения сопротивления бурового раствора проводится с помощью измеренных значений комплексного сопротивления излучающей антенны (Za). Оценка влияния зоны проникновения проводится путем сопоставления значений $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$, вычисленных по измерениям на малом и большом разносах установки.

Для интерпретации используются результаты обработки, представленные в виде:

– диаграмм частотных спектров для каждого из двух разносов (ln(Ez 2м)), ln(Ez 3.5м) и градиент-зонда ln (Ez 2м/3.5м), в которых по вертикальной оси отложена глубина, по горизонтальной – рабочие частоты, а цветом дана интенсивность измеренного поля в значениях ln(E) (рис. 2);

– графиков значений $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$, вычисленных в автоматическом режиме;

– графиков измеренных значений комплексного сопротивления излучающей антенны (Za) и фазы Fi;

– вычисленные значения коэффициентов частотной дисперсии (Kdisp), $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$.

Дополнительной информацией, используемой при интерпретации, являются данные РК (ГК, ННКТб, ГГК), кавернометрия и коэффициенты пористости (Кп), вычисленные по комплексу ГИС.

Интерпретация проводится в следующей последовательности:

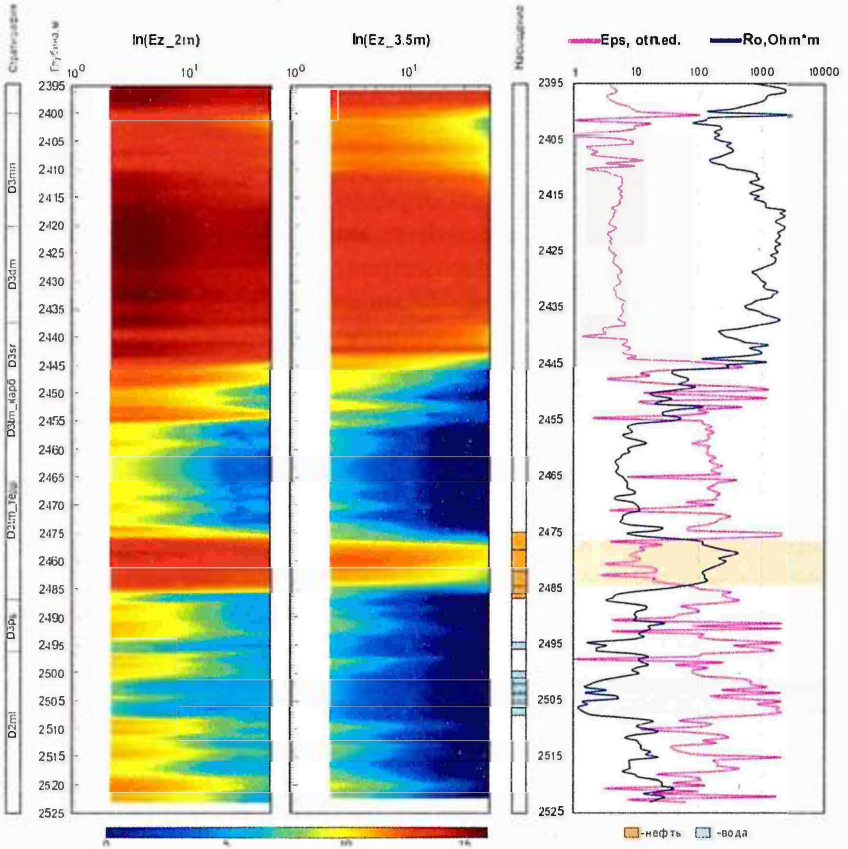

Рис. 2. Диаграммы частотных спектров и графиков значений $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$

1. По частотным спектрам выделяются основные комплексы пород, слагающие исследованный интервал, и предварительно намечаются интервалы коллекторов;

2. Проводится оценка влияния скважины путем анализа графиков измеренных значений (Za);

3. Определяются коэффициенты частотной дисперсии $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$ для основных выделенных комплексов пород и каждого пласта (рис. 3);

4. Рассчитываются значения $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$ с учетом их частной дисперсии;

5. Проводится совместный анализ данных ДИМЧ и РК и уточняются интервалы коллекторов;

6. На интервалах выделенных коллекторов с учетом коэффициента пористости ($К_П$) проводится вычисление коэффициента их водонасыщения $К_В$ и дается заключение о характере насыщения;

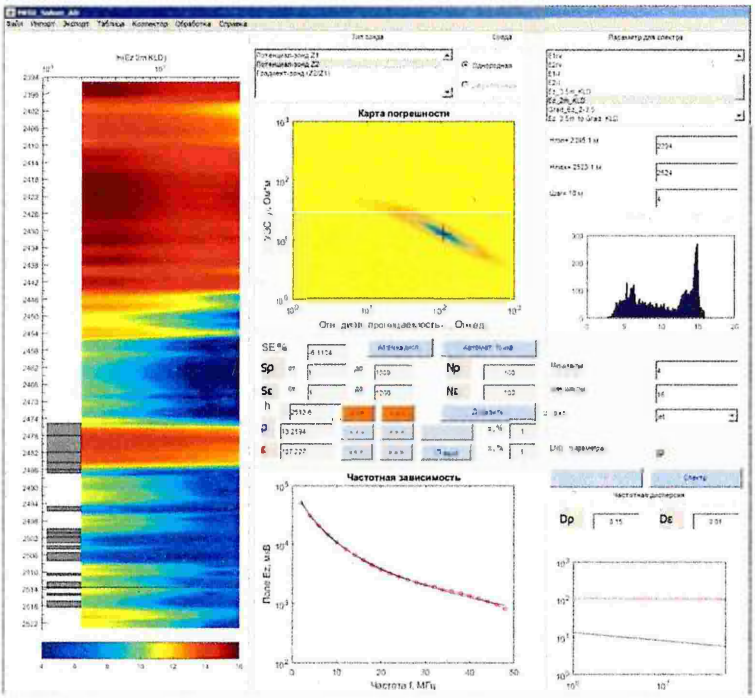

Рис. 3. Окно программы MFDI SolverAD (RU 2018663774)

В качестве примера в таблице приведены результаты по одной из скважин, в которой основной задачей являлось выделение нефтенасыщенных коллекторов. Как видно вычисленные по данным MFDI значения $К_Н$ позволяют уверенно отделить углеводородное и водное насыщение коллекторов.

Результаты применения многочастотной диэлектрической интроскопии MFDI за последние 5 лет на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» для определения нефтенасыщения терригенных и высокоомных карбонатных коллекторов, вскрытых бурением на ИЭР и в скважинах, обсаженных СПОТ, а также исследования MFDI, выполненные в доманниковых отложениях в Западной Сибири и Республике Коми в 2018 г., позволяют отметить следующие основные отличия и преимущества данного метода перед другими методами измерения электрических характеристик в разрезе скважин:

Таблица

Характеристика пластов коллекторов

№	Интервал, м			R_O, Ом-м	Eps, отн. ед.	$K_П$	Disp R_O	Коэфф. «m»	$K_В$	$K_Н$ по MFDI	Насыщение MFDI
	Кровля	Подошва	Мощность								
1	2475,1	2478,0	2,9	100,0	21,6	0,23	0,04	1,4	0,06	0,94	нефть
2	2478,0	2481,9	3,9	231,0	8,1	0,26	0,07	1,5	0,04	0,96	нефть
3	2481,9	2484,3	2,4	132,0	14,0	0,25	0,07	1,5	0,05	0,95	нефть
4	2484,3	2486,0	1,7	61,0	24,7	0,24	0,08	1,5	0,08	0,92	нефть
5	2486,0	2486,8	0,8	5,3	351,0	0,28	0,22	2,0	0,32	0,68	нефть
6	2494,6	2495,7	1,1	2,3	869,7	0,20	0,22	2,0	0,67	0,33	вода
7	2499,8	2500,8	1,0	1,8	120,0	0,24	0,28	2,1	0,72	0,28	вода
8	2500,8	2501,8	1,0	1,8	613,0	0,24	0,28	2,1	0,71	0,29	вода
9	2501,8	2503,2	1,4	1,8	705,0	0,23	0,14	1,7	0,55	0,45	вода
10	2503,8	2504,6	0,8	2,3	1000,0	0,19	0,18	1,8	0,65	0,35	вода
11	2505,4	2506,2	0,8	1,9	1000,0	0,27	0,28	2,1	0,62	0,38	вода
12	2506,2	2507,4	1,2	1,5	932,0	0,24	0,16	1,8	0,62	0,38	вода

– снимаются ограничения, связанные с использованием буровых растворов на нефтяной основе, пресноводном заводнении и наличии стеклопластиковых обсадных труб;

– размеры применяемых зондов повышают глубинность исследований, что дает возможность оперировать понятием неизмененная часть пласта;

– комплексная интерпретация с данными индукционного каротажа (например, прибором 5ИК), позволяет количественно сопоставлять продольное и поперечное сопротивление и, таким образом, оценивать электрическую анизотропию пласта;

– возможность определения диэлектрической проницаемости пласта, как прямого параметра, характеризующего характер насыщения;

– вычисление коэффициентов частотной дисперсии электрических свойств пласта, зависящие от строения коллектора (извилистости водной фазы), позволяет соотнести их с параметром m из уравнения Арчи и, по известному значению $К_П$, определить $К_В$.

В целом, метод MFDI лучше приспособлен для низкопористых коллекторов в карбонатных разрезах и буровых растворов на нефтяной основе, т. к. в первом случае возникают затруднения у индукционного каротажа, а во втором – у БК.

Одно из основных различий между MFDI и диэлектрическим сканером заключается в использовании больших разносов измерительной установки, благодаря этому удается получать значение электромагнитных параметров неизмененной части пласта. Однако это сопровождается некоторым снижением вертикальной разрешающей способности. Поэтому основным направлением совершенствования метода MFDI является разработка амплитудно-фазовой аппаратуры MFDI-2ZAF, обеспечивающей измерения разности фаз градиент-зонда и соответствующих алгоритмов обработки. Это позволит повысить, как точность определения диэлектрической проницаемости и параметров частотной дисперсии, так и вертикальное разрешение метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Истратов В. А., Перекалин С. О., Мазитова И. К., Губина А. И., Гуляев П. Н., Уточкин Ю. В.* Опыт использования комплекса электромагнитных методов каротажа для определения характера насыщения коллекторов в условиях заводнения пресными водами, применения инвертных буровых растворов и стеклопластиковых обсадных труб// НТВ «Каротажник», Выпуск 10 (256), 2015. С. 44–53.

2. Скважинный многочастотный диэлектрический интроскоп «ДИМЧ-2Z». ТУ 26.51.12-001-13239197-2019.

3. Программа обработки данных электромагнитного каротажа методом Многочастотной диэлектрической интроскопии MFDI Solver AD (RU 2018663774).

REFERENCES

1. *Istratov V. A., Perekalin S. O., Mazitova I.K., Gubina A.I., Gulyaev P.N., Utochkin Yu.V.* Opyt ispol'zovaniya kompleksa elektromagnitnykh metodov karotazha dlya opredeleniya kharaktera nasyshcheniya kollektorov v usloviyakh zavodneniya presnymi vodami, primeneniya invertnykh burovykh rastvorov i stekloplastikovykh obsadnykh trub [The experience of using a complex of electromagnetic logging methods to determine the nature of reservoir saturation in fresh water flooding, the use of invert drilling fluids, and fiberglass casing]. Karotazhnik. Issue 10 (256), 2015, pp. 44–53. (In Russian).

2. Skvazhinnyy mnogochastotnyy dielektricheskiy introskop DIMCH-2Z [Downhole multi-frequency dielectric introscope "DIMCh-2Z"]. TU 26.51.12-001-13239197-2019. (In Russian).

3. Programma obrabotki dannykh elektromagnitnogo karotazha metodom Mnogochastotnoy dielektricheskoy introskopii MFDI Solver AD [Software for processing electromagnetic logging data by the method of multi-frequency dielectric introscopy MFDI Solver AD]. (RU 2018663774). (In Russian).