ВОЗМОЖНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА ПРИМЕНительно К ИЗУЧЕНИЮ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

В.Н. Глинских^{1,2}, М.Н. Никитенко¹, А.А. Федосеев¹

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,*

630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,*

e-mail: glinskikhvn@ipgg.sbras.ru

Работа посвящена обоснованию литологической интерпретации данных диэлектрического каротажа в интервалах баженовской свиты на основе эффекта частотной дисперсии баженинов. Математическим моделированием показана высокая чувствительность относительных амплитудно-фазовых характеристик к частотно-зависимым электрофизическим характеристикам карбонатно-кремнисто-глинистых отложений в диапазоне высоких частот. Результаты исследования указывают на принципиальную возможность численной инверсии данных диэлектрического каротажа для выделения основных литологических типов пород баженовской свиты.

Диэлектрический каротаж; электрофизические параметры; частотная дисперсия; баженовская свита

POSSIBILITIES OF DIELECTRIC LOGGING APPLICABLE TO THE STUDY OF THE BAZHENOV FORMATION

V.N. Glinskikh^{1,2}, M.N. Nikitenko¹, A.A. Fedoseev¹

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,*

e-mail: glinskikhvn@ipgg.sbras.ru

The work is devoted to substantiating the lithological interpretation of dielectric logging data in the Bazhenov Formation intervals, based on the frequency dispersion effect of bazhenites. Mathematical modeling shows the high sensitivity of the relative amplitude-phase characteristics to the frequency-dependent electrophysical characteristics of carbonate-siliceous-clay deposits in a high-frequency range. The results of the study indicate the fundamental possibility of dielectric logging data numerical inversion to highlight the main lithological types of the Bazhenov Formation rocks.

Dielectric logging, electrophysical parameters, frequency dispersion, Bazhenov Formation

ВВЕДЕНИЕ

При изучении нефтяных и газовых скважин большую роль в комплексе геофизических методов исследования геологической среды играют электромагнитные методы. Одним из направлений их развития является диэлектрический каротаж (ДК), использующий мега- и гигагерцовый диапазоны частот (20 МГц–1 ГГц) [Аксельрод, 2012]. Диэлектрический каротаж на предельно высоких частотах в условиях слабопроводящих сред предназначен для исследования пространственного распределения диэлектрической проницаемости горных пород [Брылкин, Дубман, 1972; Даев и др., 1977; Кауфман, Антонов, 1971]. В настоящее время ДК успешно применяется в различных геологических условиях, где традиционные каротажные комплексы и подходы к интерпретации недостаточно эффективны [Nizem et al., 2008; Seleznev et al., 2006]. Дальнейшее развитие ДК может быть связано с изучением новых типов геологических залежей, в том числе с трудноизвлекаемыми запасами.

На протяжении последних десятилетий большой интерес вызывает всестороннее изучение нетрадиционного источника углеводородного сырья в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции – баженовской свиты. Она является не только основной нефтепроизводящей толщей и региональным глинистым флюидоупором, но также и нефтеносной толщей [Гурари, 1961]. Ее характерная особенность заключается в высокой неоднородности состава, обусловленного изменением относительного содержания в разрезе глинистых, кремнистых, карбонатных компонентов и органического вещества (керогена). Существующие технологии поиска и разведки трудноизвлекаемых запасов нефти до настоящего времени остаются недостаточно эффективными применительно к изучению этого уникального объекта. Это приводит к необходимости создания новых электромагнитных методов исследования геологической среды, а также создания соответствующей интерпретационной базы.

Как известно, осадочные горные породы традиционно характеризуются двумя основными электрофизическими характеристиками. Удельная электропроводность (УЭП) или обратная ей величина – удельное электрическое сопротивление (УЭС) осадочных пород, содержащих углеводороды, в основном зависит от таких факторов, как литологический состав, флюидонасыщение, пористость и наличие электропроводящих минеральных частиц. В меньшей мере она связана с типом порового пространства и глинистостью. Диэлектрическая проницаемость (ДП) осадочных горных пород более всего зависит от глинистости, структуры порового пространства и наличия минералов с электронной проводимостью. Эти две основные электрофизические характеристики объединяет комплексная УЭП, реальная часть которой определяется УЭП, а мнимая – ДП. Относительной диэлектрической проницаемостью (ОДП) называют таковую, измеренную в единицах ДП вакуума. Таким образом, при изучении геологических разрезов выполняется определение полного набора электрофизических параметров.

Отдельное внимание уделяется исследованию механизмов взаимодействия электромагнитного поля с геологической средой, а именно: установлению и изучению зависимости УЭП и ОДП от частоты возбуждающего среду стороннего тока, носящей название «частотная дисперсия». Этот эффект изучается на основе измерений в скважинах, лабораторных исследований на образцах керна и математического моделирования [Аксельрод, 2007; Ельцов и др., 2014; Эпов и др., 2009; Anderson et al., 2006; Garrouch et al., 2009; Morales et al., 2015; Toumelin, Torres-Verdin, 2009]. Так, по результатам лабораторных

исследований керна и обработки данных высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования (ВЭМКЗ) выявлен и детально изучен эффект частотной дисперсии УЭС и ОДП отложений баженовской свиты [Павлова и др., 2013; Эпов и др., 2019]. В бажениках частотная дисперсия обусловлена поляризацией рассеянного пирита и возникновением двойных электрических слоев на поверхностях глинистых минералов. Эти механизмы оказывают различное влияние на электромагнитные сигналы, поэтому могут составить основу литологической интерпретации данных на основе частотно-зависимых УЭС и ОДП. Установление дисперсионных свойств в широком диапазоне операционных частот делает возможным определение относительного содержания породообразующих компонентов карбонатно-кремнисто-глинистых высокоуглеродистых пород баженовской свиты, включая органическое вещество и пирит.

В представленной работе рассматривается частотная дисперсия УЭП и ОДП и изучается возможность ее оценки по данным диэлектрического каротажа применительно к изучению баженовской свиты на основе математического моделирования.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ БАЖЕНИКОВ

По данным ВЭМКЗ установлены частотные зависимости УЭС и ОДП на основе совместной численной инверсии измеряемых разности фаз и затухания амплитуд для основных литологических типов бажеников, таких как силициты, аргиллиты, карбонаты, глинисто-кремнистые микститы, карбонатно-кремнистые микститы и карбонатно-глинистые микститы с различным содержанием органического вещества и пирита.

На рис. 1 представлены частотные зависимости ОДП и УЭС для указанных шести основных литологических типов пород баженовской свиты.

Рис. 1. Частотные зависимости ОДП (а) и УЭС (б) бажеников в диапазоне частот 1 МГц–0.5 ГГц; основные литологические типы пород баженовской свиты: 1 – карбонат, 2 – микст карбонатно-кремнистый, 3 – силицит, 4 – микст карбонатно-глинистый, 5 – микст глинисто-кремнистый, 6 – аргиллит

Точками показаны частотные зависимости, установленные по экспериментальным данным ВЭМКЗ в диапазоне частот f от 0.875 до 14 МГц, а сплошными линиями – экстраполированные значения в область высоких частот до 0.5 ГГц, описываемые квадратичной и линейной зависимостями в билогарифмическом масштабе [Itskovich et al., 2018]. По изученным зависимостям $\rho(f)$ и $\varepsilon(f)$ отмечено, что дисперсия электрофизических параметров наблюдается во всех породах баженовской свиты, в том числе в породах с повышенным (>10 %) и пониженным (<10 %) содержанием органического вещества. При этом отмечается, что частотная дисперсия электрофизических параметров зависит не только от количества и типа глинистых минералов, но и от относительного содержания рассеянного пирита в органическом веществе.

В диапазоне частот ВЭМКЗ частотные зависимости УЭС и ОДП для основных литологических типов пород баженовской свиты следующие. Значения УЭС для аргиллитов изменяются в диапазоне 3–7 Ом·м, силицитов – 30–53 Ом·м, карбонатов – 59–90 Ом·м. В свою очередь, значения ОДП для этих же типов 105–412, 37–132 и 13–45 соответственно. Микститы занимают промежуточные значения между аргиллитами и карбонатами. Так, для глинисто-кремнистых микститов значения УЭС имеют диапазон 10–17 Ом·м, карбонатно-глинистых микститов – 20–35 Ом·м, карбонатно-кремнистых микститов – 45–73 Ом·м, а значения ОДП – 80–286, 54–204 и 24–85. При сопоставлении с результатами лабораторных исследований керн [Конторович и др., 2016] установлено, что на указанные диапазоны значений УЭС и ОДП баженинов наибольшее влияние оказывают пирит, глинистые минералы и органическое вещество. При этом значения ОДП повышаются при увеличении относительного содержания этих породообразующих компонентов, а УЭС понижаются. Наряду с этим содержание апатитов, силикатов и карбонатов в породе приводит к уменьшению значения ОДП и повышению УЭС. При изменении содержания глинистых минералов и органического вещества электрофизические характеристики также значительно меняются в рассматриваемом диапазоне частот, но их влияние слабее, чем рассеянного пирита. Остальные породообразующие компоненты оказывают существенно меньшее влияние на частотную дисперсию. Частотная дисперсия в баженовской свите в первую очередь вызвана распределением проводящего пирита в виде фрамбондов и в микрокристаллическом виде в породах с высоким содержанием органического вещества и с примесью глинистых минералов.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках настоящего исследования проводится анализ поведения электромагнитных сигналов и оценка их чувствительности к модельным параметрам для установления возможности определения частотного спектра УЭС и ОДП основных литологических типов баженинов.

Для восстановления частотного спектра электрофизических параметров используется широкий диапазон частот от 30 МГц до 0.5 ГГц. В этом диапазоне влияние как УЭС, так и ОДП на измеряемые амплитудно-фазовые характеристики электромагнитных откликов значительно.

В ДК измерительные датчики прибора прижаты к стенке скважины для того, чтобы увеличить чувствительность измеренных сигналов к параметрам пласта, что особенно важно на высоких частотах и в проводящем буровом растворе, где сигналы быстро затухают (рис. 2). Зондирующая установка имеет

следующее описание. Генераторная и приемные катушки расположены соосно скважине; в двух сближенных приемных катушках измеряется разность фаз и затухание амплитуды э.д.с. Длины зондов L от 0.1 до 1.8 м, база трехкатушечного зонда 0.2 м. Длины выбраны, исходя из возможности технической реализации и с учетом минимально допустимого уровня э.д.с. в приемных катушках.

Рис. 2. Модель прибора диэлектрического каротажа. Рабочие частоты: 30 МГц – 0.5 ГГц, длины зондов: 0.2 – 1.8 м

При моделировании сделаны следующие упрощения: источник электромагнитного поля можно считать точечным магнитным диполем, вычисление электромагнитного поля для дальнейшей трансформации в разность фаз и затухание амплитуды можно также производить в точке, характеризующей положение измерительной катушки. Используется численное решение задачи об электромагнитном поле вертикального магнитного диполя, смещенного с оси скважины, в цилиндрически-слоистой среде [Глинских, Никитенко, 2018; Nikitenko et al., 2016].

На рис. 3 представлены ошибки в определении частотно-зависимых ОДП и УЭС для заданных погрешностей измерений в зависимости от частоты (30 МГц–0.5 ГГц) и от длины зонда (0.1–1.8 м). Расчеты выполнены для основных литологических типов пород баженовской свиты, представленных на рис. 1. Предполагается, что по двум измерениям – разности фаз и отношению амплитуд в трехкатушечном зонде – на заданной частоте определяются 2 параметра пласта: УЭС и ОДП карбонатно-кремнисто-глинистых отложений. Параметры скважины известны: УЭС – 2 Ом·м, ОДП – 3, радиус – 0.108 м. Относительные ошибки измерений – 2 %, абсолютная ошибка разности фаз – 0.1 град, абсолютная ошибка отношения

амплитуд – 0.1 дБ. Для построения ошибок использован метод линейного проецирования области неопределенности в пространстве данных в область параметров среды [Nardi et al., 2010].

Рис. 3. Относительная погрешность определения ОДП (а) и УЭС (б) для заданной погрешности измерений в диапазоне длин зондов и частот для основных литологических типов пород баженовской свиты (условные обозначения приведены на рис. 1)

Из представленных рисунков следует, что в области допустимых параметров установки, обеспечивающих достаточный уровень сигнала, ошибки в определении параметров карбонатов, микститов карбонатно-кремнистых, силицитов, микстов карбонатно-глинистых и микститов глинисто-кремнистых в целом не превышают 10 %. Исключением является случай 6а, где на частотах до 100 МГц и для коротких зондов достигаются критические ошибки в определении параметров аргиллитов. Ошибки определения ОДП и УЭС уменьшаются с ростом частоты и длины зонда. Преобладающие значения ошибок – 2–4 %. Если рассматривать модели от первой до шестой, то происходит уменьшение УЭС и рост ОДП. Соответственно, ошибки в определении параметров увеличиваются.

Таким образом, чувствительность электромагнитных сигналов к УЭС и ОДП является достаточной для количественного определения спектров электрофизических параметров карбонатно-кремнисто-глинистых отложений баженовской свиты в выбранном диапазоне длин и частот. С уменьшением УЭС и ростом ОДП из обработки следует исключать короткие зонды на низких частотах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для установления возможности определения диэлектрических спектров карбонатно-кремнисто-глинистых отложений баженовской свиты выполнено математическое моделирование чувствительности относительных амплитудно-фазовых характеристик к частотно-зависимым электрофизическим параметрам. Частотные зависимости удельного электрического сопротивления и относительной диэлектрической проницаемости установлены по данным высокочастотных электрокаротажных зондирований для основных литологических типов баженитов. Численным моделированием показана высокая чувствительность электромагнитных сигналов к модельным параметрам баженитов в диапазоне частот от 30 МГц до 0.5 ГГц. Полученные результаты указывают на возможность численной инверсии данных диэлектрического каротажа для выделения литологических типов пород баженовской свиты, что составляет основу нового подхода к литологической интерпретации.

Исследования выполнены в рамках проекта «Идентификация математических моделей акустики, электродинамики и теории упругости» комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования».

ЛИТЕРАТУРА

- Аксельрод С.М.** Влияние частотной дисперсии электрических свойств горных пород на результаты определения удельного сопротивления пластов (по материалам зарубежной литературы) // Каротажник. – 2007. – Вып. 10 (163). – С. 103–126.
- Аксельрод С.М.** Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати) // Каротажник. – 2012. – Вып. 4 (214). – С. 78–112.
- Брылкин Ю.Л., Дубман Л.И.** О диэлектрической проницаемости горных пород осадочного происхождения // Геология и геофизика, – 1972. – № 1. – С. 117–121.

- Глинских В.Н., Никитенко М.Н.** Теоретико-алгоритмическая база и компьютерное моделирование данных диэлектрического каротажа для изучения частотного спектра электрофизических параметров геологической среды // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 53–63.
- Гурари Ф.Г.** О поисках нефти и газа в мезозое Западно-Сибирской низменности // Тр. СНИИГГиМС. – Вып. 17. – 1961. – Л.: Гостоптехиздат – С. 15–31.
- Даев Д.С., Денисов С.Б., Костин А.И.** Измерение удельного сопротивления пород методом волнового каротажа проводимости // Проблемы нефти и газа Тюмени: научн.-техн. сб. – Тюмень: ЗапСибНИГНИ. – 1977. – Вып. 33. – С. 3–7.
- Ельцов Т.И., Доровский В.Н., Гапеев Д.Н.** Низкочастотные диэлектрические спектры пород, насыщенных водонефтяной смесью // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 8. – С. 1270–1281.
- Кауфман А.А., Антонов Ю.Н.** Диэлектрический индуктивный каротаж. – Новосибирск: Наука, – 1971. – 140 с.
- Конторович А.Э., Ян П.А., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Эдер В.Г.** Классификация пород Баженовской свиты // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 11. – С. 2034–2043.
- Павлова М.А., Сухорукова К.В., Глинских В.Н.** Интерпретация данных электрометрии на интервале баженовской свиты // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Международный научный конгресс (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.): Материалы конференции. – Новосибирск: СГГА. – 2013. – Т. 2. – С. 132–136.
- Эпов М.И., Миронов В.Л., Бобров П.П., Савин И.В., Репин А.В.** Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0,05-16 ГГц // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 5. – С. 613–618.
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Петров А.М., Сухорукова К.В., Федосеев А.А., Нечаев О.В., Никитенко М.Н.** Частотная дисперсия электрофизических характеристик и электрическая анизотропия пород баженовской свиты по данным электрокаротажа // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 9. – С. 62–64.
- Anderson B., Barber T., Luling M., Sen P.** Observation of large dielectric effects on induction logs, or, can source rocks be detected with induction measurements // Transactions of the SPWLA 47th Annual Logging Symposium (June 4–7, 2006). – Veracruz, 2006. – Paper 000 (12 p.).
- Garrouch A., Alsafran E., Garrouch K.** A classification model for rock typing using dielectric permittivity and petrophysical data // Journal of Geophysics and Engineering. – 2009. – Vol. 6, No. 3. – P. 311–323.
- Hizem M., Budan H., Deville B., Faivre O., Mossé L., Simon M.** Dielectric dispersion: a new wireline petrophysical measurement // Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 21–24, 2008). – Denver, 2008. – Paper 116130 (21 p.).
- Itskovich G., Nikitenko M., Seryakov A., Zhang Y.** Determination of dispersive resistive and dielectric properties of formation using multi-frequency measurements. U.S. Patent Application Number 16/146081. Publication Date: 03.28.2019. Filing Date: 09.28.2018.
- Morales J., Trejo A., Cabrera M., Decoster E., Gea I.** Multifrequency dielectric tool identifies oil/water contacts within complex Mexican carbonates in oil-based mud // Transactions of the SPWLA 56th Annual Logging Symposium (June 18–22, 2015). – Long Beach, 2015. – Paper J (7 p.).

Nardi G., Martakov S., Nikitenko M., Rabinovich M. Evaluation of Parameter Uncertainty Utilizing Resolution Analysis in Reservoir Navigation Increases the Degree of Accuracy and Confidence in Well-Bore Placement // SPWLA 51st Annual Logging Symposium (June 19–23, 2010) – Perth, 2010. – Paper 78038 (14 p.).

Nikitenko M., Itskovich G., Seryakov A. Fast electromagnetic modeling in cylindrically layered media excited by eccentric magnetic dipole // Radio Science. – 2016. – V. 51. – P. 573–588.

Seleznev N., Habashy T., Boyd A., Hizem M. Formation properties derived from a multi-frequency dielectric measurement // Transactions of the SPWLA 47th Annual Logging Symposium (June 4–7, 2006). – Veracruz, 2006. – Paper VVV (12 p.).

Toumelin E., Torres-Verdin C. Pore-scale simulation of kHz-GHz electromagnetic dispersion of rocks: effects of rock morphology, pore connectivity, and electrical double layers // Transactions of the SPWLA 50th Annual Logging Symposium (June 21–24, 2009). – The Woodlands, 2009. – Paper 39488 (11 p.).

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ГЛИНСКИХ Вячеслав Николаевич – доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, заведующий лабораторией многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: численные методы решений прямых и обратных задач электродинамики.

НИКИТЕНКО Марина Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: математическое моделирование и численная инверсия электромагнитных зондирований.

ФЕДОСЕЕВ Арсений Артемович – инженер лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: интерпретация данных геофизических исследований в скважинах.