

ОБОСНОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЗОНДОМ В ТОНКОСЛОИСТЫХ МОДЕЛЯХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Игорь Владиславович Михайлов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к.т.н., старший научный сотрудник, e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

Марина Николаевна Никитенко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, к.т.н., старший научный сотрудник, e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

Ирина Владимировна Суродина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 6, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Проведено трёхмерное конечно-разностное моделирование электромагнитных сигналов каротажного зонда с тороидальными катушками в тонкослоистых моделях на базе электролитического бака. По результатам моделирования установлены толщины и удельные электрические сопротивления прослоев, при которых сигналы зонда в тонкослоистой и эквивалентной ей макроанизотропной модели совпадают в пределах заданной погрешности.

Ключевые слова: тороидальная катушка, численное моделирование, удельное электрическое сопротивление, тонкая слоистость, физический эксперимент

SUBSTANTIATION OF PHYSICAL EXPERIMENTS WITH ELECTROMAGNETIC TOOL IN THIN-LAYER MODELS SUBSEQUENT TO NUMERICAL SIMULATION RESULTS

Igor V. Mikhaylov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD., Senior Researcher, e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

Marina N. Nikitenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD., Senior Researcher, e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

Irina V. Surodina

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD., Senior Researcher, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

We performed 3D finite-difference simulation of electromagnetic signals from the logging tool with toroidal coils in electrolytic-tank-based thin-layer models. Following the simulation results, we elucidated the thicknesses and resistivities of the interlayers, for which the signals in a thin-layer and the equivalent macroanisotropic model coincide within the specified error.

Keywords: toroidal coil, numerical simulation, electrical resistivity, thin layering, physical experiment

Данное исследование направлено на развитие электромагнитных скважинных зондирований за счёт применения тороидальных катушек в качестве источников и приёмников сигналов [1]. Ранее выполнено математическое обоснование каротажного электромагнитного зонда с тороидальными катушками [2], созданы специализированные программно-алгоритмические средства конечно-разностного моделирования, обработки и инверсии данных [3, 4], разработаны подходы к интерпретации [5], показана возможность изучения тонкослоистых электрически анизотропных коллекторов Приобского нефтяного месторождения [6].

Основная цель исследования – обосновать численным моделированием физические эксперименты с каротажным зондом с тороидальными катушками в тонкослоистых макроанизотропных моделях, которые предполагается соорудить в электролитическом баке ИНГГ СО РАН (рис. 1). Тонкая слоистость будет достигнута чередованием имитаторов пористой среды и прослоев электролита, разделённых компактными непроводящими проставками. Имитаторы пористой среды будут представлены наборами склеиваемых или спекаемых цилиндрических гранул из полиэтилена высокого давления ($d = 0.7$ мм, $h = 2.2$ мм, $\rho = 0.910\text{--}0.967$ г/см³). Пористость имитатора может изменяться в пределах 10–30%, УЭС электролита: 1–20 Ом·м. Тонкослоистые модели должны имитировать среды со значениями коэффициента электрической анизотропии от 1.7 до 4.1.

Для выбора оптимальных параметров физических моделей, при которых тонкослоистая среда будет проявляться на электромагнитных сигналах зонда с тороидальными катушками как макроанизотропная, необходимо провести численное трёхмерное моделирование, реалистично описывающее конфигурацию электролитического бака со скважиной и тонкими прослоями. Для трёхмерного конечно-разностного моделирования используется решение прямой задачи в полной математической постановке при возбуждении электромагнитного поля круговым магнитным током [3]. Моделируемые сигналы: реальная и мнимая составляющие вертикальной компоненты электрического поля ($\text{Re}E_z$ и $\text{Im}E_z$) и тангенциальной компоненты магнитного поля ($\text{Re}H_\phi$ и $\text{Im}H_\phi$). Ниже приведены некоторые результаты численного моделирования $\text{Im}E_z$ и $\text{Im}H_\phi$, демонстрирующие основные особенности сигналов.

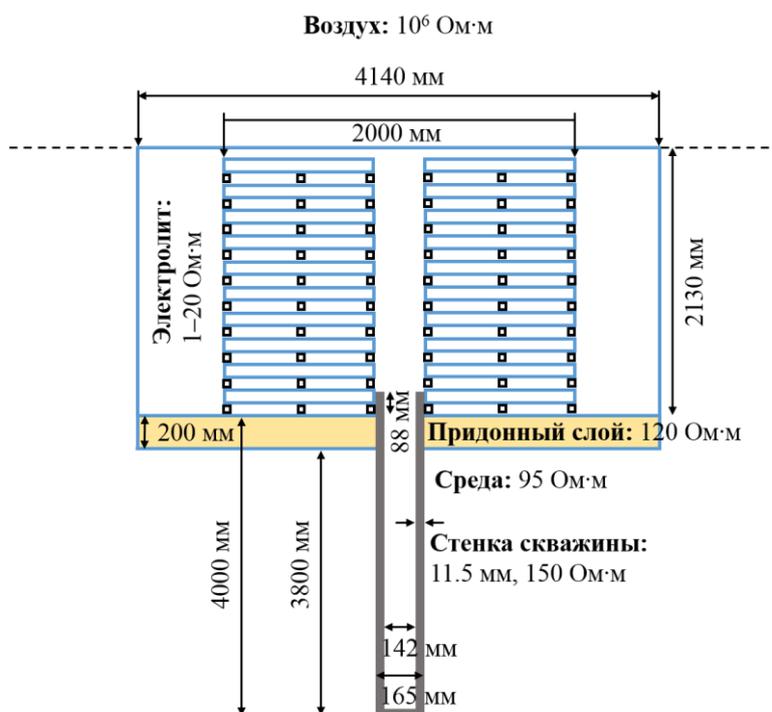


Рис. 1. Схема электролитического бака с тонкослоистой моделью в разрезе (ширина бака – 2850 мм). Под баком расположена скважина с асбоцементной стенкой. При численном моделировании не учитываются электрофизические характеристики стенок бака и проставок между прослоями

На первой стадии выполнено численное моделирование электромагнитных сигналов в баке без тонких прослоев при УЭС электролита 1 Ом·м (рис. 2). На всех диаграммах отчётливо проявлены верхняя и нижняя контрастные границы бака. Диаграмма $\text{Im}H_\phi$ суммарного режима с однонаправленными моментами симметрично расположенных генераторных катушек для центрального приёмника 0.0 м квазисимметрична относительно центра бака, а кривые приёмников -0.25 и $+0.25$ м характеризуются зеркальной симметрией. Близкие закономерности наблюдаются для $\text{Im}E_z$ в разностном режиме с разнонаправленными моментами генераторных катушек.

Максимальные значения $\text{Im}H_\phi$ в суммарном режиме отмечаются в центре бака и варьируются от 4.96 А/м (приёмник 0.0 м) до 5.54 А/м (приёмники -0.25 и $+0.25$ м); максимальные значения $\text{Im}E_z$ в разностном режиме удалены на 0.5 м внутрь бака от выделенных пунктиром границ и по модулю изменяются от $4.37 \cdot 10^{-4}$ до $1.7 \cdot 10^{-3}$ В/м. В центре бака диаграмма разностного режима для приёмника 0.0 м характеризуется точкой перегиба.

Выход сигналов суммарного режима на нижнюю асимптоту происходит на глубине 3.0 м, в то время как сигналы разностного режима близки к нулевому значению в обеих вмещающих бак средах.

При добавлении тонкослоистой модели в бак, показания обоих режимов уменьшаются и не превышают 3.67 А/м и $8.68 \cdot 10^{-4}$ В/м соответственно (рис. 3).

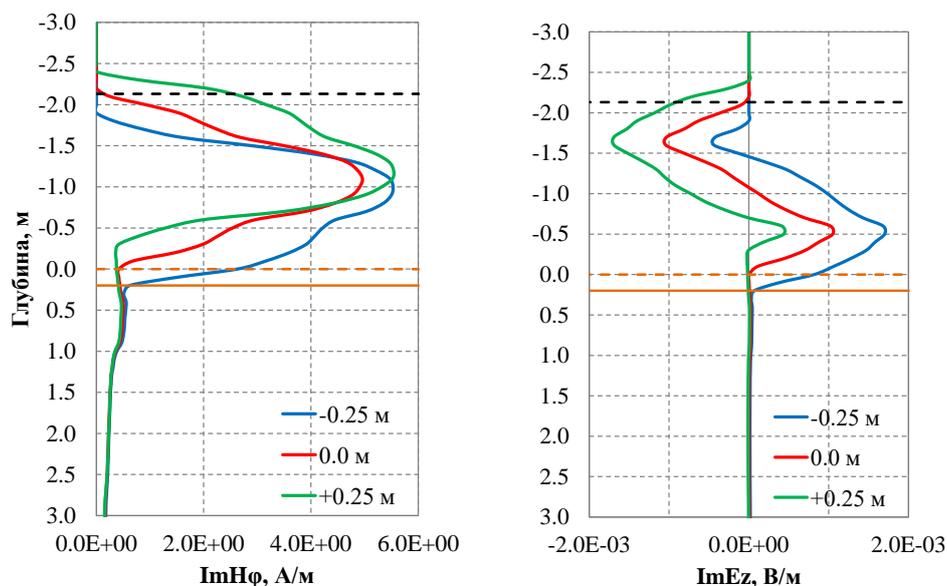


Рис. 2. Результаты трёхмерного конечно-разностного моделирования сигналов каротажного зонда с тороидальными катушками в электролитическом баке (УЭС электролита 1 Ом·м). Частота 250 кГц. Слева – суммарный режим, мнимая составляющая тангенциальной компоненты магнитного поля; справа – разностный режим, мнимая составляющая вертикальной компоненты электрического поля. Чёрная линия соответствует границе «воздух-электролит», оранжевые – придонному слою. Шифр соответствует положению приёмной катушки

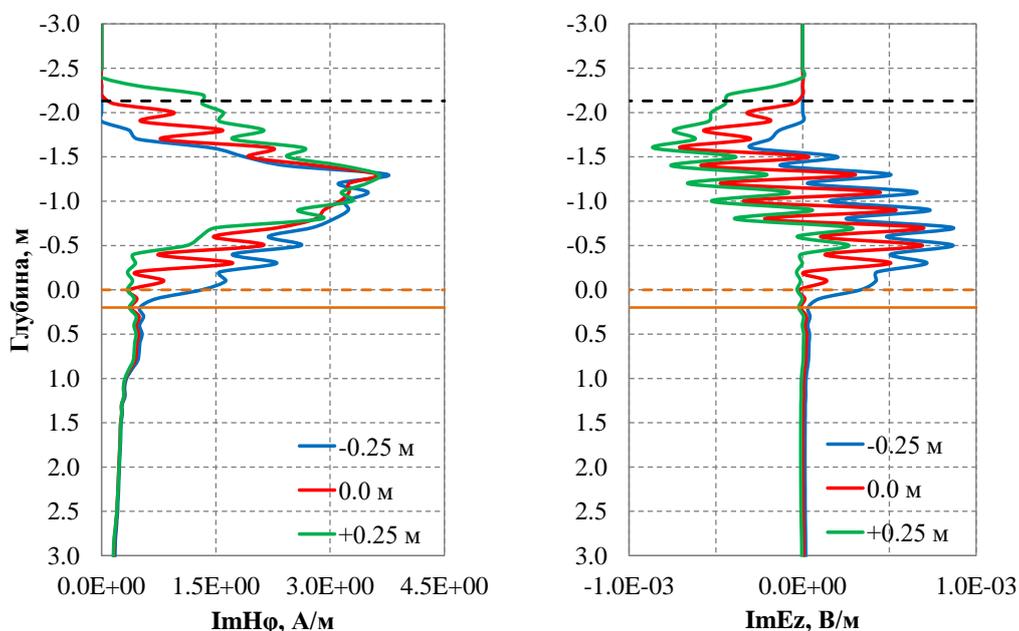


Рис. 3. Результаты трёхмерного конечно-разностного моделирования сигналов в электролитическом баке (УЭС электролита 1 Ом·м) с тонкослойной моделью (20 чередующихся прослоев с УЭС 1 и 16 Ом·м, толщиной 0.1 м). Частота 250 кГц. Обозначения – как на предыдущем рисунке

Тонкая слоистость видна на диаграммах как суммарного, так и разностного режима, но более выражена в разностном. Отметим также, что на глубине –1.3 м присутствуют выраженные экстремумы диаграмм ImN_{ϕ} с близкими значениями, равными 3.63, 3.64 и 3.76 А/м.

Соответствие между сигналами зонда с тороидальными катушками в тонкослоистой и эквивалентной макроанизотропной модели оценивается как относительное отклонение среднего значения в тонкослоистой модели от показания в эквивалентной макроанизотропной модели. Исходя из такого подхода, по предварительным результатам исследований, оптимальная толщина тонких прослоев модели в электролитическом баке для проведения физических экспериментов составляет 0.05-0.1 м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-05-00595.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н. Применение тороидальных катушек в задачах каротажа нефтегазовых скважин (аналитический обзор) // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22. – № 1. – С. 5–24.
2. Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н. Математическое обоснование нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками для высокоразрешающего каротажа нефтегазовых скважин // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2018. – Т. 16. – № 1. – С. 113–129.
3. Суродина И.В., Михайлов И.В., Глинских В.Н. Математическое моделирование сигналов тороидального источника в трехмерных изотропных моделях геологических сред // Естественные и технические науки. – 2020. – № 12. – С. 131–134.
4. Эпов М.И., Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В. Алгоритмы обработки и инверсии данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками при изучении макроанизотропных свойств пластов-коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 187–197.
5. Эпов М.И., Глинских В.Н., Еремин В.Н., Михайлов И.В., Никитенко М.Н., Осипов С.В., Петров А.Н., Суродина И.В., Яценко В.М. Новый электромагнитный зонд для высокоразрешающего каротажа: от теоретического обоснования до скважинных испытаний // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 23–27.
6. Михайлов И.В., Велесов Д.В., Глинских В.Н. Изучение тонкослоистых коллекторов с применением тороидальных источников и приемников (на примере Приобского нефтяного месторождения) // Геофизические технологии. – 2020. – № 1. – С. 16–27.

REFERENCES

1. Mihajlov I.V., Glinskih V.N., Nikitenko M.N. Primenenie toroidal'nyh katushek v zadachah karotazha neftegazovykh skvazhin (analiticheskij obzor) // Geofizicheskie issledovaniya. – 2021. – Т. 22. – №. 1. – S. 5–24.
2. Epov M.I., Nikitenko M.N., Glinskih V.N. Matematicheskoe obosnovanie novogo elektromagnitnogo zonda s toroidal'nymi katushkami dlya vysokorazreshayushchego karotazha neftegazovykh skvazhin // Vestnik NGU. Seriya: Informacionnye tekhnologii. – 2018. – Т. 16. – №. 1. – S. 113–129.

3. Surodina I.V., Mihajlov I.V., Glinskih V.N. Matematicheskoe modelirovanie signalov toroidal'nogo istochnika v trekhmernykh izotropnykh modelyakh geologicheskikh sred // Estestvennyye i tekhnicheskie nauki. – 2020. – №. 12. – S. 131–134.

4. Epov M.I., Mihajlov I.V., Glinskih V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V. Algoritmy obrabotki i inversii dannykh elektromagnitnogo zonda s toroidal'nymi katushkami pri izuchenii makroanizotropnykh svoystv plastov-kollektorov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2019. – T. 330. – №. 6. – S. 187–197.

5. Epov M.I., Glinskih V.N., Eremin V.N., Mihajlov I.V., Nikitenko M.N., Osipov S.V., Petrov A.N., Surodina I.V., Yacenko V.M. Novyj elektromagnitnyj zond dlya vysokorazreshayushchego karotazha: ot teoreticheskogo obosnovaniya do skvazhinnykh ispytaniy // Neftyanoe hozyajstvo. – 2018. – №. 11. – S. 23–27.

6. Mihajlov I.V., Velesov D.V., Glinskih V.N. Izuchenie tonkosloistyykh kollektorov s primeneniem toroidal'nykh istochnikov i priemnikov (na primere Priobskogo neftyanogo mestorozhdeniya) // Geofizicheskie tekhnologii. – 2020. – №. 1. – S. 16–27.

© *И. В. Михайлов, М. Н. Никитенко, И. В. Суродина, 2021*