

Отчет об использовании кластера ИВЦ НГУ

Тема работы:

Моделирование электромагнитного поля в областях с удельной электропроводностью, меняющейся в процессе инъекции бурового раствора в прискважинное пространство.

Состав коллектива:

Архипов Дмитрий Александрович, младший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука.

1. *Контактное лицо (ФИО, адрес электронной почты)*

Архипов Д.А., d_arhipov@list.ru

Аннотация

Реализовано численное моделирование электромагнитного поля в частотной области в естественных переменных с вмещающей средой, учитывающее разномасштабность геометрии расчетной области и изменения удельной электропроводности подобластей, в процессе инъекции бурового раствора в прискважинное пространство.

Финансовая поддержка.

Гос. Задание FWZZ-2022-0030 “Исследование многофизических процессов в гетерогенных средах, представленных трёхмерными цифровыми моделями, в геофизических приложениях”.

Научное содержание работы

1. *Постановка задачи.*

Электромагнитные исследования околоскважинного пространства выполняются в широком диапазоне частот с локальными источниками (электрическая или магнитная многовитковые катушки).

В отчете будет рассмотрена генераторная соленоидальная катушка (электрический источник) в скважине без обсадки в процессе инъекции бурового раствора из ствола скважины в прискважинное пространство.

Исследование изменения каротажных диаграмм в процессе фильтрации бурового раствора в прискважинном пространстве выполнялось в слоистой среде, представленной на рисунке 1, в которой расположена скважина с трёхкатушечным зондом. Зонд состоит из генераторной катушки (1 виток) с частотой 70 кГц и силой тока 1 А и двух приёмных катушек (в первой приёмной катушке 100 витков, во второй приёмной катушке 195 витков).

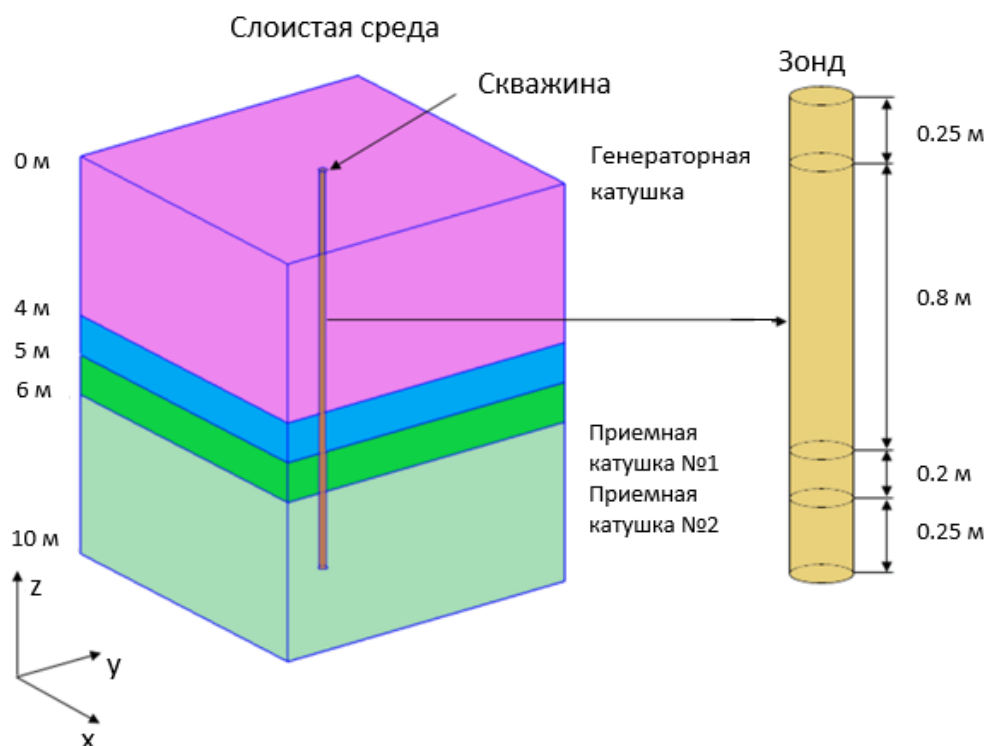


Рисунок 1. Расчетная область

Таблица 1 – Электрофизические характеристики среды

Подобласть	ϵ_r	μ_r	σ [См/м]
Корпус зонда	1	1	10^{-6}
Буровой раствор	1	1	0.5
Пропласток 1	1	1	0.297565
Пропласток 2	1	1	0.270568
Пропласток 3	1	1	0.270568
Пропласток 4	1	1	0.365068

Частота источника: 70 КГц. Сила тока: 1 А.

2. Современное состояние проблемы.

Индукционный электромагнитный каротаж (ИК) является широко распространённым методом, применяемым для идентификации нефтегазоносных пропластков с высокой и средней удельной электрической проводимостью (УЭП). По данным ИК строится профиль удельной электропроводности исследуемого разреза, а также выполняется оценка глубины и мощности залегания коллектора, пористость продуктивного пласта, степень насыщенности коллектора нефтью или газом [1] и т.д. Данный метод

эффективен при исследовании разрезов с высокой и средней удельной электрической проводимостью (УЭП).

Изучение пропластков обладающих анизотропными свойствами, требует специальных подходов как к проведению измерений, так и к обработке полученных данных [1, 2, 3].

Ключевым этапом построения инверсии полевых измерений является моделирование электромагнитного поля в каротажных измерениях [4, 5]. Следовательно, точность и время решения обратной задачи напрямую зависит от скорости и точности прямого моделирования. Наиболее распространённым методом моделирования физических полей в сложно-построенных средах со свойствами пород, изменяющимися во времени, является метод конечных элементов [6 – 7] и различные его модификации [8]. Для повышения точности определения нефтегазоносных коллекторов в настоящее время приводит к необходимости перехода к моделированию процессов в 3D [7, 9].

1. Радченко А.А. Интерпретация данных ГИС в тонкослоистом разрезе на примере терригенных отложений Западной Сибири // Труды Международной геолого-геофизической конференции: ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии, г. Москва, 05–08 февраля 2018 года. – Изд-во: ООО "ПолиПРЕСС, 2018. – С. 353–357.
2. Могилатов В. С., Потапов В. В. Универсальное математическое обеспечение для индукционного каротажа // Каротажник. – 2014. – Т. 12. – С. 76–90.
3. Федоров А. И., Эпов М. И. Определение элементов тензора электропроводности пород по данным электромагнитного каротажа // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2005. – Т. 8 (1). – С. 143–152.
4. Erov M. I., Sukhorukova K. V., Nechaev O. V., Petrov A. M., Rabinovich M., Weston H., Tyurin E., Wang G.L., Abubakar A., Claverie M. Comparison of the Russian and Western resistivity logs in typical Western Siberian reservoir environments: a numerical study // *Petrophysics*. – 2020. – V. 61 (01). – P. 38–71.
5. Nechaev O., Glinskikh V., Mikhaylov I., Moskaev I. Joint inversion of high-frequency induction and lateral logging sounding data in earth models with tilted principal axes of the electrical resistivity tensor // *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*. – 2021. – V. 29 (2). – P. 295–304.
6. Нечаев О. В., Эпов М. И., Глинских В. Н. Единый подход к трёхмерному моделированию процесса каротажа гальваническими и индукционными зондами в анизотропных средах // *Геофизические технологии*. – 2023. – Т. 3. – С. 25–33.
7. Badea E. A., Everett M. E., Newman G. A., Biro O. Finite-element analysis of controlled-source electromagnetic induction using Coulomb-gauged potentials // *Geophysics*. – 2001. – V. 66 (3). – P. 786–799.

8. Chang S. K., Anderson B. Simulation of induction logging by the finite-element method // *Geophysics*. – 1984. – V. 49 (11). – P. 1943–1958.
9. Ren Z., Kalscheuer T., Greenhalgh S., Maurer H. A finite-element-based domain-decomposition approach for plane wave 3D electromagnetic modeling // *Geophysics*. – 2014. – V. 79 (6). – P. E255–E268.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Напряженность электрического поля \mathbf{E} в частотной области с электрическим источником описывается уравнением Гельмгольца

$$\operatorname{rot}\mu^{-1}\operatorname{rot}\mathbf{E} + k^2\mathbf{E} = -i\omega\mathbf{J}_s,$$

$$\mathbf{E} \times \mathbf{n}|_{\partial\Omega} = 0$$

где $k^2 = i\omega\sigma - \omega^2\varepsilon$, \mathbf{E} -комплексная векторная функция, Ω - область моделирования, $\partial\Omega$ - граница области Ω , \mathbf{J}_s - вектор плотности тока, заданный в обмотке катушки или на поверхности, аппроксимирующей обмотку, $\mathbf{J}_s \in [\mathbf{L}_2(\Omega)]^3$.

На границах между подобластями Γ_{ij} с различными электрофизическими характеристиками должны выполняться условия непрерывности тангенциальной компоненты напряженности электрического и магнитного полей.

Выполнение условий непрерывности обеспечивает закон сохранения заряда в областях с разрывными электрофизическими характеристиками. Следовательно, вычислительные схемы как для решения систем уравнений Максвелла, так и для решения уравнения Гельмгольца, должны конструироваться таким образом, чтобы непрерывность выполнялась с заданной точностью. Векторный метод конечных элементов позволяет выполнить эти требования на уровне построения базиса.

Самым трудоемким по времени этапом моделирования электромагнитного поля методом конечных элементов является решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) полученных в процессе построения дискретного аналога исходной задачи. Использование стандартных итерационных алгоритмов, основанных на подпространствах Крылова, приводит либо к стагнации, либо к получению нефизичного решения. В данной работе строятся специальные

алгебраические многоуровневые метода, которые позволяют учитывать ядро got-оператора и не только обеспечить процесс сходимости, но и ускорить его.

4. *Полученные результаты.*

Моделирование электромагнитного поля и построение диаграмм кажущейся УЭП в процессе инжекции бурового раствора из ствола скважины выполнялось на разных временных шагах, с постепенным увеличением зоны проникновения фильтрата в прискважинное пространство. Выполненные исследования позволяют определить изменение эффективного УЭП, а, следовательно, отследить процесс насыщения пропластков буровым раствором

5. *Эффект от использования кластера в достижении целей работы.*

Использование кластера для решения поставленных задач позволяет строить численное моделирование для разномасштабных геометрических объектов расчетной области с адаптированной конечноэлементной сеткой, учитывающей все особенности задачи.

6. *Перечень публикаций*

1. Архипов Д.А., Добролюбова Д.В., Кутищева А.Ю., Марков С.И., Штабель Н.В., Штанько Е.И., Шурина Э.П. Численное моделирование многофизических процессов при бурении скважин // Тезисы конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и механики», Джанхот, 2–8 сент. 2024 г. – Екатеринбург : Изд-во ИММ УрО РАН им. Н. Н. Красовского, 2024. – С. 5.
2. Эпов М. И., Шурина Э. П., Архипов Д. А., Добролюбова Д. В., Штабель Н. В., Штанько Е. И. Численное моделирование сигналов индукционного каротажа в слоистых анизотропных нефтегазовых коллекторах // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2024. – Т. 27, № 4. – принята к печати
3. Штанько Е.И., Архипов Д.А., Эпов М.И. Влияние магнитной поляризации на диаграммы индукционного и электромагнитного каротажа // Геология и геофизика. – 2024. – Т.65, №7. – С. 1023–1035.
4. Shtanko E.I., Markov S.I., Kutishcheva A.Yu., Shtabel N.V., Dobrolyubova D.V., Arhipov D.A. Retrieving Rock Conductivity Model During Well Drilling //Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Proceedings IEEE XVI International Scientific and Technical Conference, (Novosibirsk, 10-12 november 2023) – Novosibirsk – С. 1170-1175 – 2023.

7. *Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию.*

С появлением узлов с оперативной памятью 190 Гбайт, полностью перешел на ваш кластер и доволен его работой.