


## WL03



I.N. Yeltsov\* (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS), G. Nesterova (IPGG SB RAS), L. Nazarov (CIM SB RAS) & L. Nazarova (CIM SB RAS)

---

## SUMMARY

---

Multiphysical model of productive reservoirs includes the description of the main interconnected and interdependent physical processes in the vicinity of the well and the main parameters of these processes. Only by taking into account all essential factors of mud-filtrate invasion, we can build an effective strategy of logging data interpretation, to reliably estimate the reservoir parameters. Otherwise during data inversion unaccounted features of the invaded zone will transfer on the formation properties, and it will result in incorrect forecast of oilfield characteristics. Coupled electrophysical and geomechanical model of borehole environment involves consideration of geomechanical processes during drilling, changes of filtration-volumetric properties of rocks, filtration processes, salt transfer, growth and destruction of the mud cake, change of the electrical characteristics of medium, calculating of electrical and electromagnetic logging data for realistic medium models. To build models authors used software for simulation of filtration processes of two-phase fluid and salt transport under stress-strain state, computer models of the electrical conductivity of heterogeneous medium and programs for calculating readings of electric (BKZ) and electromagnetic (VIKIZ) logging tools for three-dimensional environments, as well as the data of laboratory petrophysical and geomechanical measurements from PetroMechBD database, created with the participation of the authors.

## Совместные электрофизические и геомеханические модели нефтенасыщенных коллекторов<sup>1</sup>

И.Н. Ельцов\* (ИНГГ СО РАН), Г.В. Нестерова (ИНГГ СО РАН), Л.А. Назаров (ИГД СО РАН), Л.А. Назарова (ИГД СО РАН)

### Введение

Развитию совместных флюидо-геомеханических моделей посвящено много работ [Settari and Mourits, 1998; Chin et al., 2000; Thomas et al., 2003; Tran et al., 2005; Settari, Sen, 2008; Lautenschläger et al., 2013; Jalali, Dusseault, 2012; Ельцов и др., 2012, 2014]. Особенно активно они развиваются в последнее время, что предопределено достигнутыми возможностями математического и численного моделирования, а также востребованностью в прикладных задачах геологоразведки и добычи углеводородов.

В зависимости от гидрофизических, электрофизических и геомеханических свойств пластов, режимов бурения при первичном вскрытии пласта могут существенно или, напротив, пренебрежимо мало изменяться фильтрационно-ёмкостные свойства пласта, на основе которых затем строятся промысловые стратегии и схемы разработки месторождений. Характеристики процесса фильтрации бурового раствора в пласт при бурении, определяемые геомеханическим и гидродинамическим воздействием на прискважинную зону могут существенно влиять на показания каротажных приборов, что должно учитываться при интерпретации материалов геофизических исследований в скважинах (ГИС).

Также много работ посвящено и проблемам интерпретации данных электрического и электромагнитного каротажа на основе моделирования гидродинамических процессов, связанных с проникновением фильтрата бурового раствора в пласт [Zang et al., 1998; Ярмахов и др., 2003; Эпов и др., 2004; Salazar et al., 2006; Alpak et al., 2006; Ельцов и др., 2011; Heidari and Torres-Verdín, 2012].

Настоящая работа направлена на построение многофизичной модели нефтенасыщенного коллектора, согласующей в себе описание основных взаимосвязанных и взаимообусловленных физических процессов в окрестности скважины и основных параметров, контролирующих эти процессы. Только при учёте всех существенных факторов, определяющих формирование зоны проникновения при бурении, можно построить эффективную стратегию интерпретации каротажных данных и достоверно оценить фильтрационно-ёмкостные параметры пласта. В противном случае неучтённые особенности прискважинной зоны перенесутся при инверсии на свойства пласта и приведут ошибочным прогнозам промысловых характеристик. Совместная электрофизическая и геомеханическая модель (ЭГДиГМ) прискважинной зоны предполагает рассмотрение геомеханических процессов при бурении скважины, изменения фильтрационно-ёмкостных свойств пород, процессов фильтрации, солепереноса, роста и разрушения глинистой корки, изменения электрофизических характеристик пород с расчетом показаний зондов электрического и электромагнитного каротажа для реалистичных моделей сред. Теоретическо-методическая основа данной работы представлена в [Назарова и др., 2012; Yeltsov I. et al., 2015].

### Методы исследования

При модельном подходе важно выбрать адекватную задаче параметризацию среды, чтобы учесть все основные модельные параметры, значимо влияющие на моделируемые процессы. Единая ЭГДиГМ модель нефтенасыщенных коллекторов описывается параметрами пласта, бурового раствора и режима бурения, а также меняющимися со временем полями напряжений, водонасыщенности, солёности, удельного электрического сопротивления (УЭС). От последнего зависит поведение синтетических диаграмм каротажных зондов (мы используем высокочастотное индукционное зондирование (ВИКИЗ) и боковое каротажное зондирование

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00830.

(БКЗ). Для построения моделей авторы используют программный комплекс моделирования процессов фильтрации двухфазной жидкости в пласт и солепереноса в условиях напряжённо-деформированного состояния в результате бурения скважины [Ельцов и др., 2012; Свидетельство о гос. регистрации..., 2012; Назарова и др., 2013; Ельцов и др., 2014; Нестерова и др., 2014], компьютерные модели электропроводности гетерогенных сред [Нестерова, 2008; Глинских и др., 2014] и программы расчёта показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ [Суродина, Нестерова, 2015] для трёхмерных сред, а также данные лабораторных петрофизических и геомеханических измерений, составляющих базу данных PetroMechVD [Свидетельство о гос. регистрации ..., 2015], созданную при участии авторов. В базу данных входят не только числовые параметры, но и измеренные зависимости проницаемости от напряжения, которые определяют новые значения фильтрационно-ёмкостных параметров вблизи скважины в результате эволюции зоны проникновения.

На рис. 1 приведены поля УЭС для отдельных моментов времени, которые являются элементами ЭГДиГМ модели для типичных параметров бурения нефтенасыщенных песчаников: глубина пласта 3000 м, пористость  $K_p=10\%$ , проницаемость нетронутой части пласта  $K_{пр}=20$  мД, нефтенасыщенность- 75%, минимальный и максимальный коэффициенты бокового распора  $q_{min}=0.63$ ,  $q_{max}=0.8$ , отношение вязкостей пластовой воды и нефти равно 0.25; отношение проницаемостей вблизи скважины и в пласте 0.6, перепад давления на глинистой корке равно 5% от пластового, прочность породы 12 МПа (рис 1а) или 9 МПа (рис 1б).

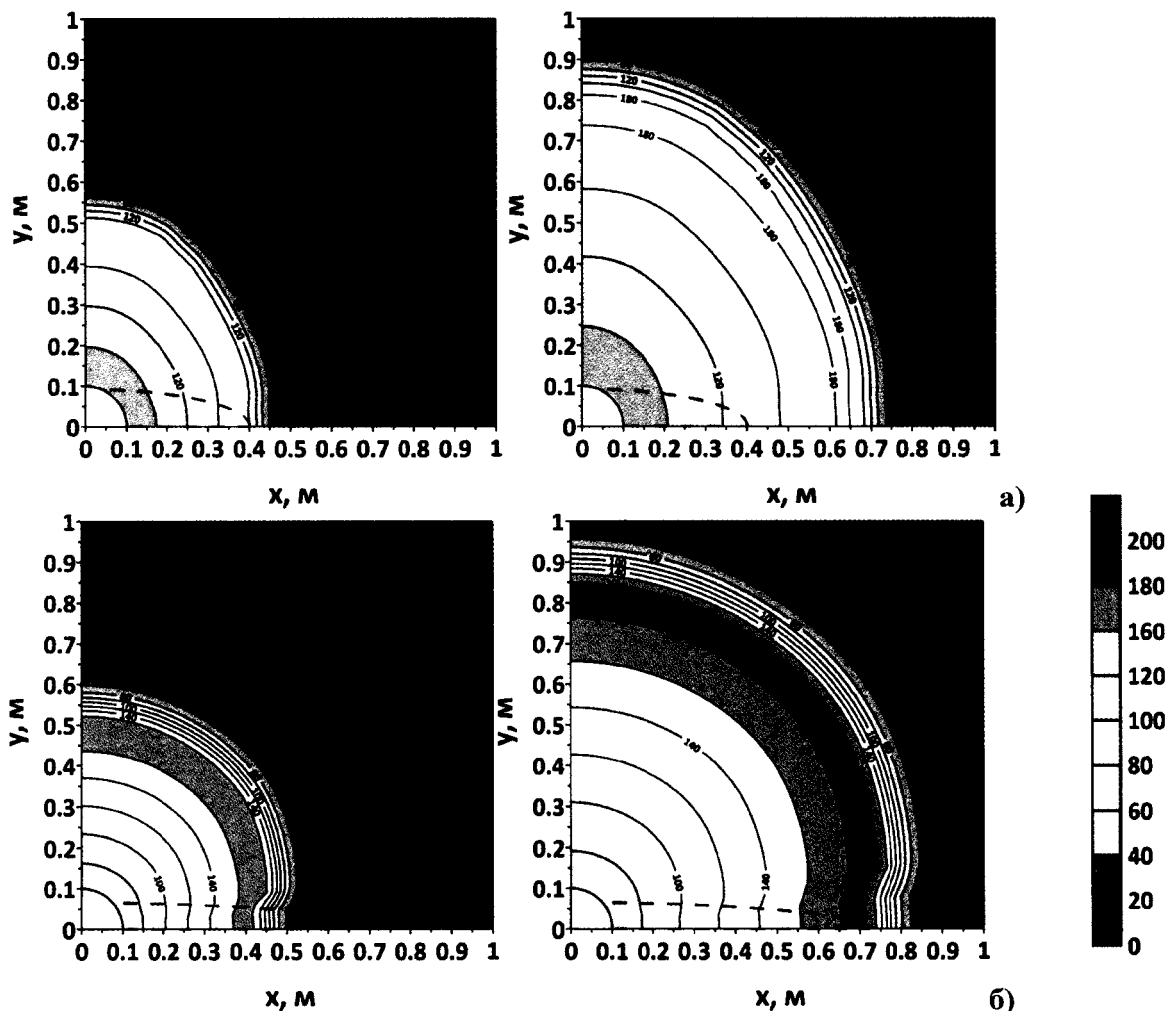


Рисунок 1 Элементы ЭГДиГМ модели: УЭС (Ом·м) для 24 часов (слева) и 144 часов (справа) после вскрытия пласта. Показан один квадрант в сечении скважины.

## Выводы

Применительно к задачам исследований в нефтегазовых скважинах имеется целый комплекс геофизических, технологических, инженерных и других измерений, которые практически не используются для системного анализа и уточнения прогнозных характеристик пластов. В результате бурения изменяются электрические свойства среды, а современный уровень скважинной геоэлектрики обеспечивает эффективный мониторинг перечисленных выше процессов. Расчёты показывают, что в типичных условиях бурения терригенных разрезов, необходимо учитывать и геомеханические и гидродинамические условия формирования прискважинной зоны. Единая многофизическая модель процессов, протекающих в окрестности скважины является инструментом, позволяющим использовать комплекс скважинных измерений для повышения достоверности оценки параметров продуктивных пластов.

## Библиография

1. Глинских В.Н., Нестерова Г.В., Эпов М.И. Моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа с использованием петрофизических моделей электропроводности // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5-6. – С. 1001-1010.
2. Ельцов И.Н., Нестерова Г.В., Кашеваров А.А. Петрофизическая интерпретация повторных электромагнитных зондирований в скважинах // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 6. – С. 852-861.
3. Ельцов И.Н., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В., Эпов М.И. Интерпретация геофизических измерений в скважинах с учетом гидродинамических и геомеханических процессов в зоне проникновения // ДАН. – 2012. – Т. 445. – № 6. – С. 671-674.
4. Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Эпов М.И. Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбурываемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5-6. – С. 978-990.
5. Назарова Л.А., Назаров Л.А., Эпов М.И., Ельцов И.Н. Мультидисциплинарная модель околоскважинного пространства для описания эволюции физических полей различной природы // The Proceeding of International Conference “Topical Problems of Continuum Mechanics”. – 8-12 октября 2012. Tzakhkadzor, Armenia. – P. 89-93.
6. Назарова Л.А., Назарова Л.А., Эпов М.И., Ельцов И.Н. Эволюция геомеханических и электрогидродинамических полей в массиве горных пород при бурении глубоких скважин // ФТПРПИ. – 2013. – № 5. – С. 37-49.
7. Нестерова Г.В. Математические модели электропроводности двухкомпонентных сред и формула Арчи (по материалам публикаций) // Каротажник. – 2008. – № 10. – С. 81-101.
8. Нестерова, Г.В. Моделирование гидродинамических процессов в напряжённо-деформированной прискважинной зоне и геофизические приложения [Текст] / Г.В. Нестерова, И.Н. Ельцов, В.А. Киндюк, Л.А. Назаров, Л.А. Назарова // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2014. – Сборник статей. – М.: «EAGE Геомодель». – 2014 – С. 327-344.
9. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012619496 РФ. GENM / Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В., Ельцов И.Н. Правообладатель: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. – № 2012619496 от 19.10.2012.
10. Свидетельство о гос. регистрации базы данных PetroMechBD / Ельцов И.Н., Голик ов Н.А., Киндюк В.А., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В. // Правообладатель: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. – № 2015620912 от 11.07.2015 года.
11. Суродина И.В, Нестерова Г.В. Моделирование показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ на графических процессорах // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2015. Сборник статей EAGE. – 2015. – С. 85-94.

12. Эпов, 2004 Эпов М.И., Ельцов И.Н., Кашеваров А.А., Соболев А.Ю., Ульянов В.Н. Эволюция зоны проникновения по данным электромагнитного каротажа и гидродинамического моделирования // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45 (8) . – С. 1031-1042.
13. Ярмахов И.Г., Попов С.Б. Комплексный метод гидродинамики околоскважинного пространства и индукционного (диэлектрического) каротажа при изучении нефтегазовых скважин // Каротажник. – Тверь, 2003. – №10. – С. 63-83.
14. Alpak F. O., Torres-Verdín C., Habashy T. M. Petrophysical inversion of borehole array-induction logs: Part I — Numerical examples // Geophysics. – 2006. – V. 71. – No. 4. – P. F101-F119.
15. Chin L.Y., Rajagopal Raghavan, Thomas L.K. Fully coupled geomechanics and fluid-flow analysis of wells with stress-dependent permeability // SPE Journal. – 2000. – V. 5. – No 1. – P. 32-45.
16. Heidari Z., and Torres-Verdín C. Estimation of dynamic petrophysical properties of water-bearing sands invaded with oil-base mud from the interpretation of multiple borehole geophysical measurements // Geophysics. – 2012 . – V. 77. – No 6. – P. D209–D227.
17. Jalali, M.R Coupling Geomechanics and Transport in Naturally Fractured Reservoirs [Текст] / M.R. Jalali, M.R. Dusseault // Int. J. Min & Geo-Eng. (IJMGE) . – V. 46. – No. 1. – Dec. 2012. – P. 1-26.
18. Lautenschläger C. E. R., Righetto G. L., Inoue N., Barreto da Fontoura S.A. Advances on partial coupling in reservoir simulation: A new scheme of hydromechanical coupling // 2013 North Africa Technical Conference & Exhibition, Apr 15 - 17. – 2013. – InterContinental Citystar, Cairo, Egypt. – Conference Paper 164657-MS. – 8 p.
19. Salazar J.M., Torres-Verdin C., Alpak F.O., Habashy T.M., Klein J.D. Estimation of permeability from borehole array induction measurements: Application to the petrophysical appraisal of tight gas sands // Petrophysics. – 2006. – Vol. 47. – No 6. – P. 527-544.
20. Settari A., Mourits F.M. Coupled Reservoir and Geomechanical Simulation System A // SPE Journal. – 1998. – V. 3. – No 3. – P. 219-226. – SPE Paper 50939-PA.
21. Settari A.T., Sen V. Geomechanics in Integrated Reservoir Modeling // Offshore Technology Conference held in Houston, Texas, U.S.A., 5–8 May 2008. – Conference paper 19530-MS. – 9 p.
22. Thomas L.K., Chin L.Y., Pierson R.G., Sylte J.E., Coupled Geomechanics and reservoir simulation // SPE Journal. – 2003. – V. 8. – No 12. – P. 350-358.
23. Tran D., Nghiem L., Buchanan L. Iterative coupling of geomechanics with reservoir simulation // SPE Reservoir Simulation Symposium, 31 January-2 February 2005, The Woodlands, Texas. – ISBN 978-1-61399-010-0. – Conference paper 93244-MS. 8 p.
24. Yeltsov I., Nesterova G., Nazarova L., Nazarov L. Multidisciplinary model of borehole environment and formation evaluation [Электронный ресурс] // The World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium - WMESS 2015 (Prague, Czech Republic, 7-11 September 2015): Abstract Collection. - Prague, 2015. - P. 318-318. - CD-ROM.