

К. В. Сухорукова¹✉, Д. В. Касплер², О. В. Нечаев¹

Результаты численного моделирования сигналов электрического микрокаротажа в нефтегазовых коллекторах терригенных отложений Западной Сибири

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: suhorukkv@gmail.com

Аннотация. С применением численного моделирования сигналов электрического микрокаротажа проведены расчеты в геоэлектрических моделях терригенных отложений Западной Сибири. Конечно-элементный алгоритм синтезирует сигналы микроградиент-зонда, микропотенциал-зонда и микробокового зонда с их произвольным положением в цилиндрически-слоистой геоэлектрической модели. Приведены результаты расчетов в базовых геоэлектрических моделях терригенных отложений Западной Сибири. Параметры моделей соответствуют значениям УЭС нижнемеловых нефтесодержащих коллекторов и глинистых флюидоупоров, а также условиям бурения на полимерных и глинистых растворах, включая формирование повышающих и понижающих зон проникновения и фильтрационных корок. Расчетные сигналы микроградиент и микропотенциал зонда характеризуются небольшой глубиной, микропотенциал и микробокового зондов – значительной зависимостью от УЭС бурового раствора. На сигналы влияют параметры глинистой корки и зоны проникновения, а также, в некоторых моделях, анизотропия УЭС пласта.

Ключевые слова: численное моделирование, конечно-элементный алгоритм, электрический микрокаротаж, удельное электрическое сопротивление, электрическая анизотропия

K. V. Sukhorukova¹✉, D. V. Kaspler², O. V. Nechaev¹

Results of numerical modeling of electrical microlog data in oil and gas reservoirs of western siberian clastic deposits

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: suhorukkv@gmail.com

Abstract. Using numerical modeling of electrical microlog data, calculations were performed in geoelectric models of Western Siberian clastic deposits. A finite element algorithm synthesizes signals from a microgradient (or microinverse) probe, micropotential (or micronormal) probe, and microlateral probe with their arbitrary positions in a cylindrically layered geoelectric model. The results of calculations in basic geoelectric models of Western Siberian clastic deposits are presented. The model parameters correspond to the resistivity values of Lower Cretaceous oil and gas reservoirs and reservoir-hosting shales, as well as to drilling conditions with polymer and clay muds, including the invaded zones and filter cakes. The calculated signals of the microgradient and micropotential probes are characterized by shallow depths, while the signals of the micropotential and microlateral probes are significantly dependent on the resistivity of the drilling mud. The signals are affected by the

parameters of the mud cake and invaded zone, as well as, in some models, by the anisotropy of the formation resistivity.

Keywords: numerical modeling, finite element algorithm, electrical micrologging, resistivity, electrical anisotropy

Введение

Определение радиального распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) в нефтегазовом коллекторе необходимо для его учета при постановке обратной электрогидродинамической задачи [1, 2, 3, 4]. Радиальное изменение УЭС в пласте, насыщенном пластовой водой и нефтью или газом формируется в момент бурения скважины и проникновения в поровое пространство фильтрата бурового раствора (ФБР) и определяется фильтрационно-емкостными свойствами коллектора, соотношением и физическими свойствами пластовой воды и нефти, типом бурового раствора и параметрами бурения. При этом особо важна ближняя к стенке скважины область, свойства которой, с одной стороны, определяют процесс дальнейшей фильтрации, позволяя уточнить коэффициент пористости, проницаемость и содержание остаточных флюидов [5], а с другой – могут быть определены по данным зондов электрического микрокаротажа.

Зонды микрокаротажа разработаны более полувека назад и широко применяются при исследовании нефтегазовых скважин (рис. 1).

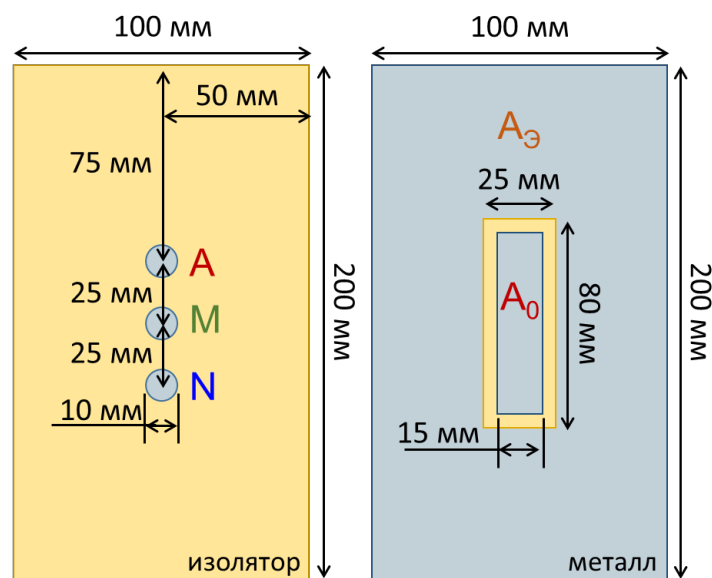


Рис. 1. Модели микрозондов: слева – микроградиент-зонд А0.025М0.025N и микропотенциал-зонд А0.05N (А – токовый электрод, М и N – измерительные электроды), справа – микробоковой зонд (центральный электрод А₀ и экранированный электрод А_Э разделены изолятором).

Это гальванические зонды, характеризующие область от 2–3 до 10–15 см от стенки скважины [6, 7, 8, 9, 10]. По данным микроградиент (МГЗ) и микропотенциал

(МПЗ) зондов (рис. 1 слева) выделяются проницаемые пласты – потенциальные коллекторы (рис. 2). По данным микробокового фокусирующего (МБК) зонда (рис. 1 справа) в некоторых случаях оценивается УЭС зоны, которая считается полностью промытой фильтратом. Это предположение иногда используется в методике интерпретации данных ГИС, потому что УЭС ФБР оценивается по палеткам и может быть пересчитано в коэффициент пористости или для оценки параметров формулы Арчи.

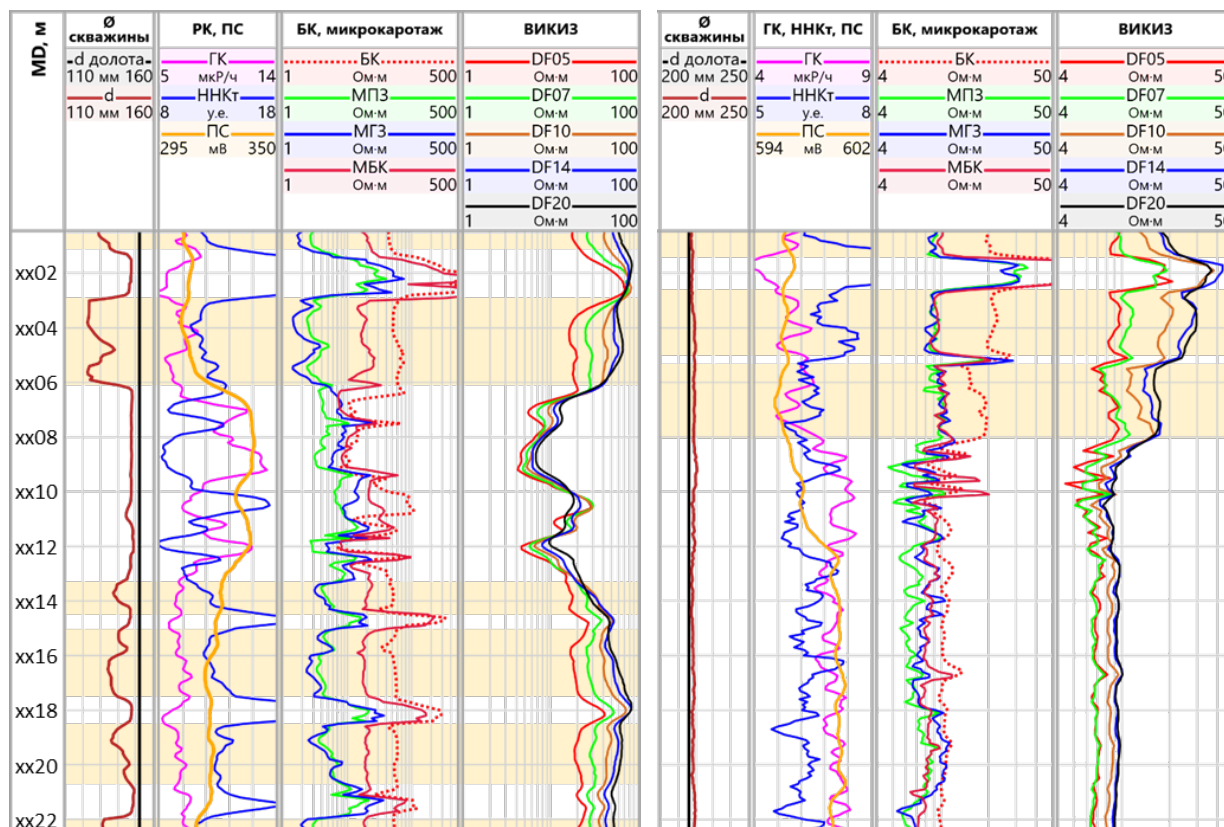


Рис. 2. Диаграммы данных ГИС из двух скважин. Буровой раствор: фильтрующий (слева, $\rho = 0.8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), нефилтрующий (справа, $\rho = 1.16 \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

На каждом из рисунков, слева направо: диаметры (d) скважины и долота; данные радиоактивного (ГК), нейтрон-нейтронного (ННКт) каротажа и потенциала самополяризации (ПС); данные микрозондов и бокового каротажа (МБК, МГЗ, МПЗ, БК); данные ВИКИЗ (DF05–DF20). Коллекторы выделены желтой подложкой.

Применение новых буровых растворов, а также повышение качества записи электрокаротажных данных ставит задачу численного моделирования сигналов микрокаротажа в базовых геоэлектрических моделях, характерных для нефтегазовых коллекторов западносибирских месторождений.

Методы и материалы

Глубинность зондов МГЗ и МПЗ оценивается в 4 и 10 см соответственно [9]. При бурении на фильтрующем буровом растворе на сигнал МГЗ влияют

свойства глинистой корки, а в сигнал МПЗ добавляется влияние зоны проникновения (ЗП), поры в которой содержат пресный ФБР и остаточные пластовую воду и углеводороды. УЭС фильтрационной корки обычно меньше, чем УЭС ЗП ($\rho_{зп}$), поэтому кажущееся сопротивление (ρ_k) по данным МГЗ меньше, чем по данным более глубинного МПЗ, что считается надежным признаком фильтрации бурового раствора вглубь пласта, а значит – признаком наличия пористости и проницаемости породы. В непроницаемых пластах проникновения нет, глинистая корка не формируется, поэтому считается, что значения ρ_k для всех микрозондов должны быть примерно равны. При бурении на нефилтующемся полимерном растворе практические данные микрозондов часто различаются минимально и могут одинаково выглядеть в интервалах как коллектора, так и глинистого пласта. Однако в современных данных микрокаротажа встречаются другие соотношения сигналов: ρ_k для МПЗ ($\rho_{k\text{ МПЗ}}$) меньше, чем для МГЗ, а ρ_k для МБК ($\rho_{k\text{ МБК}}$) близко к ρ_k для МГЗ ($\rho_{k\text{ МГЗ}}$), что отлично от "классического" случая и требует численного исследования. Особенный интерес представляют сигналы, измеряемые в интервалах анизотропных пород, ранее частично рассмотренные Е.В. Чадаевым [11].

Для моделирования сигналов электрического микрокаротажа в ИНГГ СО РАН созданы программы, основанные на конечно-элементных алгоритмах [12].

Результаты

Сигналы МГЗ, МПЗ и МБК для геоэлектрических моделей, описывающих свойства флюидоупоров и коллекторов разреза Западной Сибири и типичные условия измерения в скважинах, приведены на рис. 3–4.

В модели "скважина – пласт" (верхний левый график на рис. 3) значение ρ_k растет с увеличением УЭС бурового раствора ($\rho_{бр}$) для всех микрозондов, однако в большей степени для МПЗ и МБК. Небольшое влияние $\rho_{бр}$ на сигналы МГЗ объясняется тем, что этот зонд измеряет разность потенциалов между близко расположенными измерительными электродами М и N, поэтому изменение $\rho_{бр}$ практически не влияет. Значения $\rho_{k\text{ МПЗ}}$ и $\rho_{k\text{ МБК}}$ ниже, чем $\rho_{k\text{ МГЗ}}$ в практически важном диапазоне значений $\rho_{бр}$, меньших, чем значения ρ_p . Такое соотношение сигналов зондов встречается в современных практических данных на интервалах как непроницаемых глинистых отложений, так и коллекторов при отсутствии фильтрационной корки на стенке скважины.

При повышающем проникновении ФБР (нижний левый график на рис. 3) отсутствие глинистой корки обеспечивает быстрый выход $\rho_{k\text{ МГЗ}}$ на уровень $\rho_{зп}$: $\rho_{k\text{ МГЗ}} = 19.5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при $h_{зп} > 0.06 \text{ м}$. Значения $\rho_{k\text{ МПЗ}}$ выходят на значения, соответствующие $\rho_{зп}$, при $h_{зп} > 0.07\text{--}0.1 \text{ м}$, значения $\rho_{k\text{ МБК}}$ – при $h_{зп} > 0.15 \text{ м}$. Значение $\rho_{бр}$ занижает кажущееся УЭС МПЗ и МБК на 20% относительно ρ_p при $h_{зп} \approx 0.0 \text{ м}$ и на 25% относительно $\rho_{зп}$ при $h_{зп} > 0.15 \text{ м}$. Понижающее проникновение сильнее влияет на сигналы (нижний правый график на рис. 3): при $h_{зп} > 0.07 \text{ м}$ все зонды выходят на значение $\rho_{зп}$.

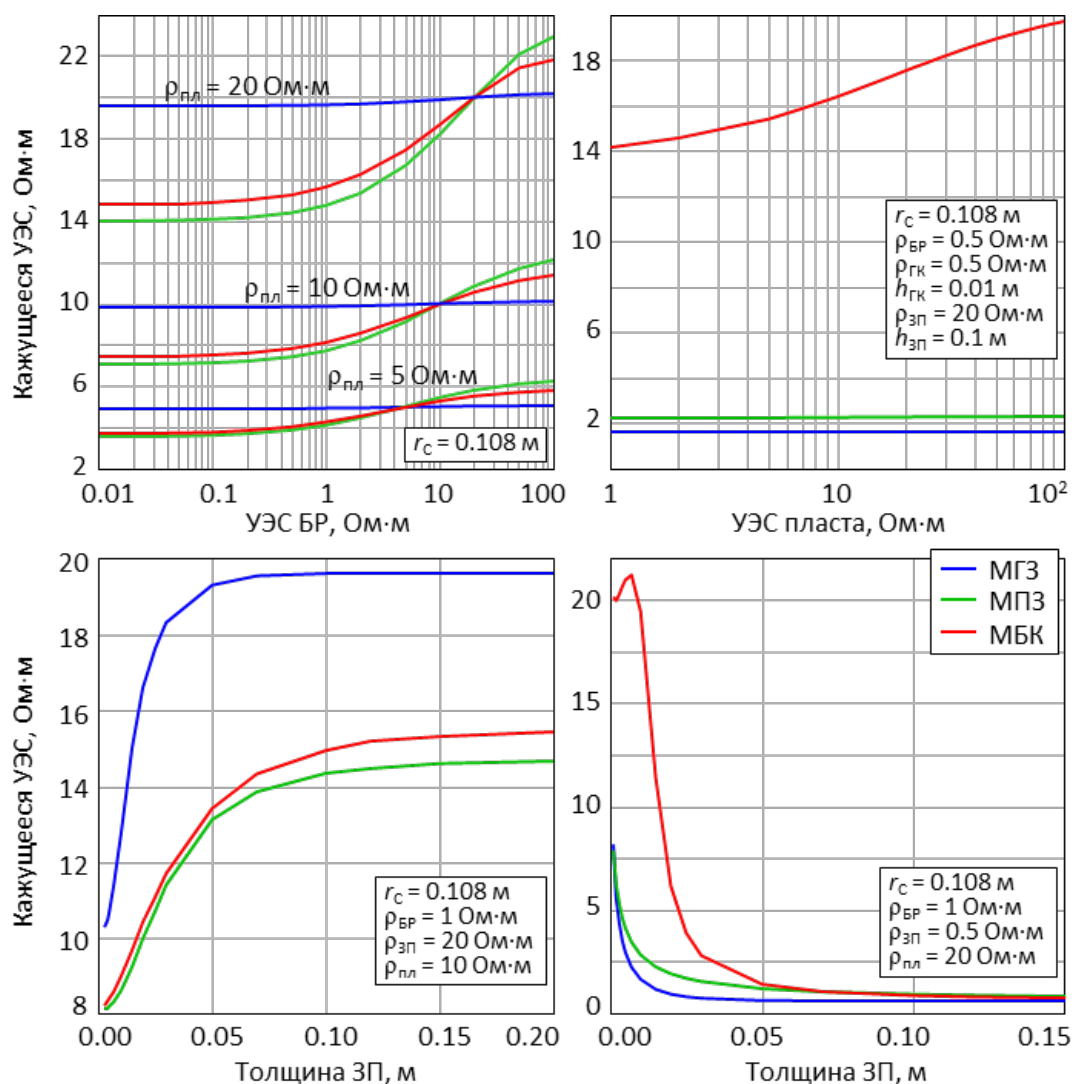


Рис. 3. Графики зависимости сигналов микрозондов,верху: от УЭС пласта ($\rho_{пл}$) и бурового раствора ($\rho_{БР}$) в моделях «скважина – пласт» и «скважина – глинистая корка – ЗП – пласт»; внизу: от толщины ЗП ($h_{ЗП}$) в модели «скважина – ЗП – пласт». Параметры моделей приведены на графиках.

Соотношению ρ_k МГЗ, ρ_k МПЗ и ρ_k МБК, наблюдаемому при измерении в интервалах коллекторов с глинистой коркой (рис. 2 слева), соответствуют результаты расчетов в модели на верхнем правом графике (рис. 3). Влияние корки толщиной 1 см и ЗП толщиной 10 см практически лишает МГЗ и МПЗ чувствительности к изменяющемуся УЭС пласта. Изменяется только ρ_k МБК, незначительно возрастающая при изменении $\rho_{пл}$ на два порядка.

Сигналы, рассчитанные в моделях с электрически анизотропным пластом ($\rho_h = 6 \text{ Ом·м}$), показаны на рис. 4. В модели «скважина – анизотропный пласт» моделирующей глинистые отложения, зависимость от $\rho_{БР}$ сильная у сигналов МПЗ и МБК и практически незначимая у сигналов МГЗ. Сигналы всех зондов

повышаются с увеличением значения ρ_v пласта, но сигналы МПЗ – в меньшей степени, чем сигналы МГЗ и МБК.

При тех же значениях $\rho_{бр}$ и ρ_h пласта наличие тонкой пятимиллиметровой изотропной глинистой корки ($\rho_{ГК} = 1$ Ом·м одинаково для всех $\rho_{бр}$) существенно снижает чувствительность зондов к анизотропии пласта и уменьшает сигналы зондов МПЗ и МГЗ, меняя их соотношение по сравнению с сигналами в первой модели. При такой слабой зависимости практическая точность реальных измерений, скорее всего, недостаточна для выявления влияния анизотропии при наличии глинистой корки.

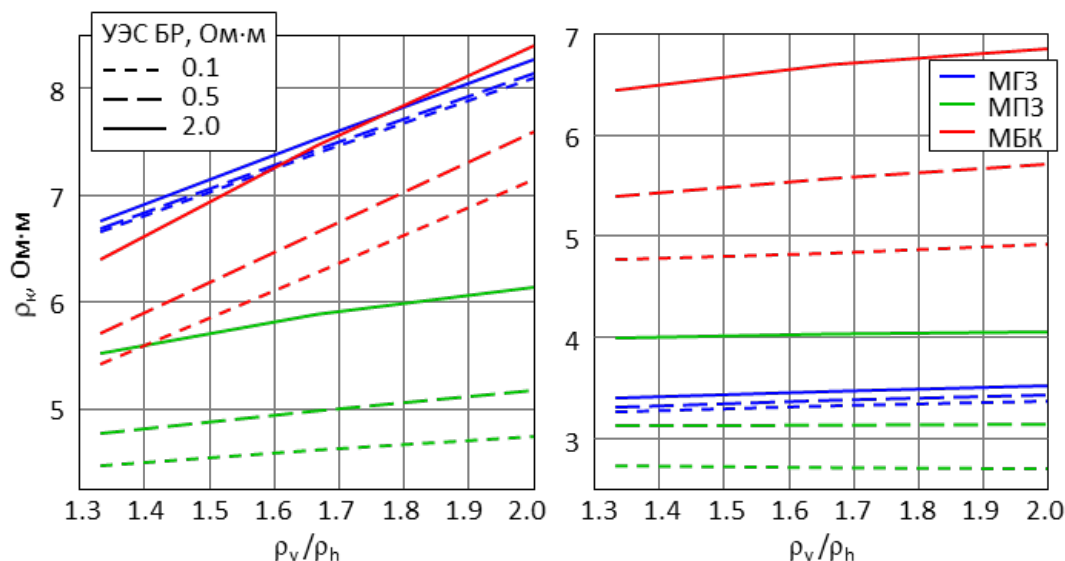


Рис. 4. Зависимость сигналов микрозондов от отношения ρ_v/ρ_h пласта.

Слева: Модель слева «скважина – анизотропный пласт», справа «скважина – глинистая корка – анизотропный пласт».

Заключение

С применением программ численного моделирования, реализующих конечно-элементный алгоритм в цилиндрически-слоистой постановке с произвольным положением зондов, проведены серии тестовых расчетов сигналов электрического микрокаротажа. Геоэлектрические модели описывают условия нижнемеловых коллекторов Западно-Сибирской НГП, вскрытых на глинистом и полимерном буровых растворах. Выявлены основные зависимости для моделей непроницаемых пластов, моделей с глинистой коркой и зоной проникновения при разных значениях параметров.

Анализ сигналов показывает небольшую глубинность МГЗ и МПЗ, сильную зависимость сигналов МПЗ и МБК от УЭС бурового раствора и параметров глинистой корки. Соотношение сигналов зондов в моделях с глинистой коркой и без нее соответствует измеренным в скважинах сигналам. В моделях без зоны проникновения и развитой глинистой корки выявлена чувствительность всех зондов

к анизотропии пласта, при наличии корки и тонкой изотропной зоны проникновения слабая чувствительность наблюдается только у зонда МБК.

Благодарности

Исследование в части моделирования сигналов в электрически анизотропных средах выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2026-0049.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eпов M., Yeltsov I., Kashevarov A., Sobolev A., Ulyanov V. (2002). Time evolution of the near borehole zone in sandstone reservoir from the data of repeated high-frequency electromagnetic logging // SPWLA 43rd Annual Logging Symposium. June 2–5, Paper ZZ, 10 p.
2. Кашеваров А.А., Ельцов И.Н., Эпов М.И. Гидродинамическая модель формирования зоны проникновения при бурении скважин // Прикладная механика и техническая физика, 2003, т. 44 (6), с. 148–157.
3. 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, № 8, с. 1033–1044.
4. Нестерова Г.В., Кашеваров А.А., Ельцов И.Н. Эволюция зоны проникновения по данным повторного каротажа и гидродинамического моделирования // Каротажник, №1(166), 2008, с. 52–68.
5. Сухорукова К.В., Нестерова Г.В., Примаков С.А. Выявление окаймляющей зоны при совместной инверсии сигналов гальванического и электромагнитного каротажного зондирования, измеренных одновременно и в разное время // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2022, № S11, с. 77–86.
6. Doll H.G. (1950). The Microlog – a New Electrical Logging Method for Detailed Determination of Permeable Beds // Petroleum Transactions, AIME, v. 189, p. 155–164.
7. Doll H.G. (1953). The Microlaterolog // Petroleum Transactions, AIME, v. 189, p. 17–32.
8. Пирсон С.Д. (1961). Учение о нефтяном пласте. Москва, Гостоптехиздат, 580 с.
9. Итенберг С.С. (1987). Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. Москва, Недра, 375 с.
10. Ellis, D.V., Singer, J.M. (2008). Well Logging for Earth Scientists. 2nd Edition, Springer, Berlin, 685 p.
11. Чаадаев Е.В. (1989). Теория электрического и электромагнитного каротажа. Калинин, ВНИГИК, НПО "Союзпромгеофизика" Министерства геологии СССР, 445 с.
12. Сухорукова К.В., Нечаев О.В., Суродина И.В., Касплер Д.В. Численное моделирование сигналов электрического микрокаротажа в нефтегазовых коллекторах терригенных отложений Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2026. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_89003383_86725442.pdf

© К. В. Сухорукова, Д. В. Касплер, О. В. Нечаев, 2026