

Геофизические технологии, № 4, 2023, с. 53–63 doi: 10.18303/2619-1563-2023-4-53 **www.rjgt.ru** УДК 550.832

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ТРЕЩИН НА ДАННЫЕ СКВАЖИННОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

К.В. Сухорукова, И.В. Суродина, О.В. Нечаев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: suhorukkv@gmail.com

На основе результатов численного моделирования сигналов скважинной электрометрии рассматривается влияние вертикальных техногенных трещин на данные гальванических методов электрокаротажа. Геоэлектрические модели представляют собой пространство с разными значениями УЭС, скважину и осесимметричные трещины, заполненные буровым раствором. Влияние трещин, ограниченных по радиальной глубине, на данные гальванического каротажа приводит к изменению сигналов, аналогичному изменению напротив пласта с зоной проникновения, находящегося в пределах интервала трещин. По данным БКЗ подбирается модель как пласта с понижающей зоной проникновения, так и непроницаемого пласта с вертикальным УЭС, меньшим горизонтального. Тонкие вертикальные трещины не влияют на сигналы индукционных зондов, что, при совместном анализе с данными гальванических зондов, может быть признаком их наличия.

Техногенная трещина, боковое каротажное зондирование, боковой каротаж, численное моделирование, численная двумерная инверсия, геоэлектрическая модель

RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF THE EFFECT OF VERTICAL FRACTURES ON ELECTRICAL LOGGING DATA

K.V. Sukhorukova, I.V. Surodina, O.V. Nechaev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: suhorukkv@gmail.com

Based on the results of numerical modeling, the effect of vertical drilling-induced fractures on the data of galvanic electrical logging methods is considered. Geoelectric models represent a space with different resistivity values, a well and axisymmetric fractures filled with drilling fluid. The effect of fractures limited in radial depth on galvanic logging data leads to a change in signals similar to the change opposite the formation with a penetration zone located within the fracture interval. Based on the on gradient probes and focused logging data, a model of both a formation with an invaded zone and an impermeable formation with a vertical resistivity less than the horizontal one is selected. Thin vertical fractures do not affect the signals of induction probes, which may be a sign of their presence.

Drilling-induced fracture, gradient probes, focused probes, numerical modeling, numerical 2D inversion, geoelectric model

ВВЕДЕНИЕ

Практические данные ГИС в интервалах доюрских отложений Западной Сибири показывают, что в представленных переслаиванием карбонатных, терригенно-карбонатных и терригенных пород разрезах газовые и нефтенасыщенные коллекторы уверенно отмечаются наличием радиальных изменений УЭС в

© К.В. Сухорукова, И.В. Суродина, О.В. Нечаев, 2023

прискважинной зоне. Этот эффект часто отмечается при бурении как на пресном глинистом, так и на полимерном, пресном и соленом, растворах. Однако для отложений с пустотным пространством смешанного порово-трещиновато-кавернозного типа также отмечается наличие продольных техногенных трещин, образующихся при воздействии буровым долотом, заполнение которых буровым раствором также изменяет сигналы электрокаротажа. В связи с наличием подобных трещин и необходимостью оценивать их параметры целесообразно расширение численного анализа их влияния на сигналы гальванического каротажа.

В трещиноватых породах часто выявляются вертикальные трещины разной раскрытости и протяженности [Лимбергер, 2022]. Они фиксируются в данных каротажа в открытом стволе скважин – акустических или электрических имиджеров, и в извлекаемых образцах пород – в керновом материале. Хорошо развитые трещины обуславливают движение флюидов в каверно-трещинном коллекторе, и уже поэтому их локализация и оценка параметров представляют практический интерес [Голф-Рахт, 1986]. С другой стороны, при воздействии долота на породу на забое скважины формируется опережающая система трещин, но часть ее затрагивает и прискважинную область, определяя в том числе и кавернообразование.

Локализация и ориентация возникающих при бурении трещин определяется неравномерностью механических напряжений массива породы, наблюдаемой преимущественно в горизонтальной плоскости, и большая часть трещин является субвертикальными [FMI – Fullbore..., 2023]. Пример отражения субвертикальных трещин в данных электрического микроимиджера FMI приведен на рис. 1. Как естественная, так и техногенная раскрытая трещина заполняется буровым раствором во время бурения соответственно соотношению давлений бурового раствора и пластового флюида. Для оценки влияния трещины с раствором на данные скважинной электрометрии при разных параметрах скважины проведены численные эксперименты и анализ сигналов в трехмерных моделях сред с вертикальными трещинами.



Рис. 1. Субвертикальные трещины (темно-коричневые полосы) на стенке скважины по данным электрического микроимиджера FMI [FMI – Fullbore..., 2002]

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сигналы БКЗ (зонды A0.2M0.1N, A0.4M0.1N, A1.0M0.1N, A2.0M0.5N, A4.0M0.5N) рассчитывались конечно-разностным алгоритмом моделирования (реализованный математический подход аналогичен описанному в [Суродина, 2015], программная реализация модифицирована), сигналы БК – конечноэлементным алгоритмом [Эпов и др., 2007; Нечаев и др., 2022]. Результаты первых расчетов для единичной трещины сигналов БКЗ в ряде моделей приводились в публикациях [Лапковская и др., 2021; Эпов и др., 2021].

Сигналы БК (рис. 2) рассчитаны для трехэлектродной конфигурации зонда БК-3, реализованного в аппаратурном комплексе СКЛ [Каюров и др., 2015] (геометрические параметры зонда: длина электрода А 0.12 м, экранирующих электродов ≈1 м, длина изолятора между центральным и экранирующими электродами 0.03 м, диаметр зонда 0.102 м). Параметры трещины: осесимметричная (плоскость проходит через ось скважины), прямоугольной формы, толщина *h*_T = 1 мм, *ρ*_T = *ρ*_c, длина вдоль скважины *L* = 1 и 5 м, радиус внешнего края 0.3, 0.5 и 0.8 м. Параметры скважины выбраны типичными для технологии бурения компании "Сургутнефтегаз": радиус 0.108 м, пресный глинистый раствор с УЭС = 1 Ом·м – вертикальная скважина; радиус 0.062 м, полимерный раствор с УЭС = 0.1 Ом·м – боковой ствол.

Изменение сигналов БК на интервале трещины практически одинаково для моделей с радиусом трещины 0.5 и 0.8 м, поэтому на рисунке приводятся графики для случаев с радиусом трещины 0.3 и 0.8 м.



Рис. 2. Сигналы БК напротив вертикальной трещины. Значения УЭС пласта и параметры скважины указаны на графиках. Толщина трещины 1 мм, УЭС равно УЭС бурового раствора, длина вдоль скважины (м) и радиус внешнего края (м) – цветовое обозначение кривых: 1 и 0.3 м – черный цвет; 5 и 0.3 м – красный; 1 и 0.8 м – зеленый; 5 и 0.8 м – синий

Поскольку идеальная прямоугольная форма плоскости трещины в реальной среде практически маловероятна, экстремумы настолько красивой формы на реальных практических диаграммах будут сглажены и несимметричны. Поэтому целесообразно анализировать не максимальные и минимальные значения в экстремумах диаграмм, а общую их форму и отклонение значений на интервале трещины от уровня сигнала в ненарушенном пласте. Наличие трещины приводит к снижению кажущегося

сопротивления БК, тем более значительному, чем больше контраст УЭС пласта и бурового раствора. При этом разрешающая способность сигнала БК по отношению к глубине трещины оказывается невысокой: сигналы для радиуса трещины более 0.5 м практически одинаковы.

Для случая широкой скважины с пресным буровым раствором уменьшение уровня КС от уровня вне интервала трещины составляет не более 1 % для УЭС пласта 10 Ом·м, разница для разной глубины трещины практически не существенна; от 3 до 8 % для УЭС пласта 100 Ом·м; от 15 до 25 % (длина трещины 5 м) и от 25 до 40 % (длина 1 м) для УЭС пласта 1000 Ом·м. То есть, при пресном глинистом растворе трещины в низкоомных пластах не будут влиять на сигнал БК в необходимой для их уверенного выделения степени, однако в слабо проводящих породах будут хорошо заметны. В тонкой скважине с буровым раствором вдесятеро большей электропроводности это уменьшение составит от 5 до 8 % для УЭС пласта 10 Ом·м; от 16 до 40 % для УЭС пласта 100 Ом·м; от 21 до 50 % (длина трещины 5 м) и от 50 до 70 % (длина 1 м) для УЭС пласта 1000 Ом·м.

То есть продольная трещина будет приводить к форме диаграммы БК, похожей на форму при пересечении более проводящего, чем вмещающая среда, пласта толщины, соответствующей длине трещины. Чувствительность к внешнему радиусу трещины незначительна при его значении более 0.5 м.

Сигналы БКЗ рассчитаны для наиболее распространенных в последние десятилетия геометрических параметров градиент-зондов: A0.4M0.1N, A1.0M0.1N, A2.0M0.5N, A4.0M0.5N, N0.5M2.0A, входящих в состав зондирующей системы приборов серии К1Ф-723 и СКЛ, кроме них в приборе СКЛ есть зонд A0.2M0.1N. На рисунке 3 приведены результаты расчетов в виде графиков, соответствующих тем же моделям среды, что и на рис. 2 (УЭС пласта 10, 100, 1000 Ом·м, УЭС бурового раствора 1 и 0.1 Ом·м, радиус скважины 0.108 и 0.062 м). Длины зондов обозначены на соответствующих группах кривых. Параметры трещины те же: осесимметричная (плоскость проходит через ось скважины), прямоугольной формы, толщина *h*_T = 1 мм, *ρ*_T = *ρ*_c, длина вдоль скважины *L* = 1 и 5 м, радиус внешнего края 0.5 и 0.8 м.



Рис. 3. Сигналы БКЗ напротив вертикальной трещины. Значения УЭС пласта указаны на графиках; верхние графики – ρ_c = 1 Ом⋅м, радиус скважины 0.108 м; нижние графики – ρ_c = 0.1 Ом⋅м, радиус скважины 0.062 м. Параметры трещины: толщина 1 мм, УЭС равно УЭС БР (р_т = 1 и 0.1 Ом⋅м), длина вдоль скважины (м) и радиус внешнего края (м) – цветовое обозначение кривых: 1 и 0.5 м – черный цвет; 5 и 0.5 м – красный; 1 и 0.8 м – зеленый; 5 и 0.8 м – синий

Поскольку конструкция градиент-зондов не симметрична, в данном случае не во всех моделях можно охарактеризовать отклонение уровня сигнала. Однако можно заметить, что в моделях с небольшим контрастом УЭС отклонения от уровня сигналов во вмещающих породах не велики: в моделях с широкой скважиной не более 4 % при УЭС пласта 10 Ом·м и до 10 % при УЭС 100 Ом·м, притом отклонение слабо зависит от глубины трещины. Видимая на диаграммах разница возникает при большой длине трещины, более проявлена для длинных зондов и достигает 20–25 % в моделях с тонкой скважиной с более проводящим заполнением трещины. Большого видимого различия диаграмм для разного радиального размера трещины при ее длине 1 м не наблюдается.

Форма диаграмм БКЗ при движении вдоль интервала с трещиной похожа на форму при пересечении пласта с меньшим, чем у окружающего пространства, УЭС или пласта с понижающей зоной проникновения.

Зависимость сигналов зондов БКЗ от количества трещин иллюстрируется на примере модели с одной, двумя и четырьмя трещинами. Радиус скважины 0.108 м, УЭС БР $\rho_c = 1$ Ом·м, УЭС пласта $\rho = 100$ Ом·м, симметричные трещины пересекают ось скважины, толщина трещин 1 мм, $\rho_T = \rho_c = 1$ Ом·м, длина трещин вдоль скважины 5 м, радиус внешнего края 0.8 м. Увеличение количества трещин приводит к большему отклонению сигналов от их уровня на интервала вне трещин (рис. 4). Диаграммы зонда N0.5M2.0A симметричны относительно середины интервала трещин диаграммам зонда A2.0M0.5N и по этой причине не приводятся.

Очевидно сходство рассчитанных диаграмм с диаграммами, наблюдаемыми в модели с пластом пониженного сопротивления или с пластом с зоной проникновения. Поэтому первым предположением при анализе диаграмм будет выделение пласта в интервале между экстремумов сигналов и их подбор в рамках трехпластовой модели.



Кажущееся сопротивление БКЗ, Ом м

Рис. 4. Сигналы БКЗ напротив интервала с вертикальными трещинами и рисунок геоэлектрической модели. УЭС пласта ρ = 100 Ом⋅м, радиус скважины 0.108 м. Параметры трещин: толщина 1 мм, УЭС равно УЭС БР ρ_т = ρ_c = 1 Ом⋅м, длина вдоль скважины 5 м (интервал обозначен горизонтальными линиями), радиус внешнего края 0.8 м

ЧИСЛЕННАЯ ИНВЕРСИЯ РАССЧИТАННЫХ СИГНАЛОВ

Ввиду того, что диаграммы в модели однородного пласта с трещинами схожи с диаграммами при пересечении пласта другого УЭС или пласта с ЗП, первой при количественной интерпретации сигналов на интервале трещины будет задаваться трехпластовая модель с определением параметров ЗП и УЭС пласта. Количественная интерпретация заключалась в численной инверсии рассчитанных данных БКЗ в классе двумерных осесимметричных геоэлектрических моделей [Петров и др., 2019; Epov et al., 2020].

Для сигналов, рассчитанных в модели с двумя трещинами, численная многопластовая инверсия в классе двумерных осесимметричных моделей приводит к модели пласта с УЭС от 98.6 до 105.0 Ом·м с параметрами ЗП (УЭС / толщина) от 61 / 0.26 до 66 / 0.37 (Ом·м / м) (рис. 5); для сигналов в модели с четырьмя трещинами – УЭС пласта от 102 до 104 Ом·м, параметры ЗП от 26.0 / 0.36 до 28.1 / 0.40 (Ом·м / м) (рис. 6). Определяемый радиус измененной зоны в среднем коррелирует с радиальной глубиной трещин, но не достигает этого значения. Вариативность параметров зоны проникновения зависит от числа зондов, используемых в инверсии, а также от динамического диапазона их изменения.



Рис. 5. Сигналы БКЗ (Ом·м) напротив интервала с двумя вертикальными трещинами (пунктир; плоскости трещин перпендикулярны друг другу) и сигналы (сплошная линия), рассчитанные в модели с пластом с зоной проникновения (справа)

Поскольку рассматриваются модели с небольшим количеством тонких трещин, в естественном аналоге среды в сигналах микрозондов тонкие трещины могут не проявиться из-за своей толщины, меньшей диаметра электрода, и выбор модели пласта с измененной прискважинной зоной не будет обоснованным. В этом случае интервал с трещинами может быть описан непроницаемым анизотропным пластом. Для модели с двумя трещинами эквивалентной анизотропной будет модель пласта с горизонтальным УЭС около 88 Ом·м и вертикальным УЭС 69 Ом·м при номинальном диаметре скважины, качество подбора сигналов при этом в среднем соответствует обычному качеству подбора практических данных (рис. 7), за исключением восьмиметрового зонда. Сигналы, рассчитанные в модели с четырьмя трещинами, с удовлетворительным качеством подбираются в трехпластовой анизотропной модели при параметрах: горизонтальное УЭС 70.4 Ом·м, вертикальное УЭС 39.2 Ом·м, номинальный диаметр

скважины (рис. 8); при изотропных вмещающих пластах – горизонтальное УЭС 73.4 Ом·м, вертикальное УЭС 56.8 Ом·м, диаметр скважины увеличен до 0.116 м. Сигналы в модели с четырьмя трещинами подбираются с довольно большой невязкой, при этом горизонтальное УЭС пласта определяется на 30 % меньше, чем в исходной модели, а вертикальное УЭС в этом случае много меньше, чем горизонтальное.



Рис. 6. Сигналы БКЗ (Ом·м) напротив интервала с четырьмя вертикальными трещинами (прерывистая линия; между плоскостями соседних трещин 45°) и сигналы (сплошная линия), рассчитанные в модели с пластом с зоной проникновения (справа)



Рис. 7. Сигналы БКЗ (Ом·м) напротив интервала с двумя вертикальными трещинами (пунктир; плоскости трещин перпендикулярны друг другу) и сигналы (сплошная линия), рассчитанные в анизотропной модели (справа)

Расчеты сигналов индукционного и электромагнитного зондов в модели с вертикальными трещинами подтверждают отсутствие практически значимого изменения на интервале трещин: поскольку УЭС трещиноватых пород обычно высокое, а толщина трещин очень маленькая, их вклад в

электропроводность среды в направлении протекания формирующихся токов оказывается незначительным.



Рис. 8. Сигналы БКЗ (Ом·м) напротив интервала с четырьмя вертикальными трещинами (прерывистая линия; между плоскостями соседних трещин 45°) и сигналы (сплошная линия), рассчитанные в анизотропной модели (справа)





Проведены расчеты для оценки вклада в сигналы БКЗ наклонной трещины конусообразной формы (рис. 9). Приблизительно такая форма трещин приводится (кроме прочих) для некоторых режимов бурения при образовании опережающей долото системы трещин в матрице хрупких глубоко залегающих пород [Синев, 2016]. Параметры трещины задавались следующими: трещина отходит от стенки скважины вниз под углом 45° и охватывает полупространство *у* > 0, ее проекция на вертикаль *H*_T = 0.3 м, толщина трещины *h*_T = 1 и 10 мм, параметры скважины: радиус *r*_T = 0.108 м, УЭС БР *р*_T = 1 Ом·м, УЭС пласта *ρ* = 100 Ом·м.

Чувствительность к такой трещине, при много больших, чем возможные, размерах, оказывается слишком низкой, чтобы ее учитывать при численном анализе данных градиент-зондов: в интервале "устья" трещины на стенке скважины даже при толщине 1 см сигналы изменяются всего в 2–3 точках при шаге отсчетов глубины 0.1 м и всего на 1–5 Ом⋅м в точке максимального изменения (рис. 9). Такое изменение, при реальном уровне помех, не будет достаточным для выделения такой особенности в практических сигналах.

выводы

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что влияние вертикальных техногенных трещин, ограниченных по радиальной глубине, на данные гальванического каротажа фокусированными зондами БК и градиент-зондами БКЗ приводит к изменению сигналов, аналогичному изменению напротив пласта, находящегося в пределах интервала трещин. По сигналам БКЗ модель пласта лучше подбирается с понижающей зоной проникновения, но в классе непроницаемых пород может быть подобрана и с вертикальным УЭС, меньшим горизонтального, при небольшом увеличении диаметра скважины. При этом тонкие вертикальные трещины не влияют на сигналы индукционного (ИК) и электромагнитного (ВЭМКЗ, ВИКИЗ) каротажа. Разница в реакции сигналов методов, основанных на разном типе электромагнитного воздействия, может быть признаком наличия вертикальных трещин.

Влияние невертикальной трещины на сигналы БКЗ оценено для конусообразной формы, по результатам расчетов оно заметно только на ограниченном 2–3 отсчетами интервале скважины (на интервале выхода трещины на стенку скважины). Изменение сигналов небольшое и может быть не распознано на уровне помех.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

ЛИТЕРАТУРА

Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – М.: Недра, 1986. – 608 с.

Каюров К.Н., Еремин В.Н., Петров А.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Аржанцев В.С. Аппаратурный комплекс СКЛ для каротажа в нефтегазовых скважинах и его интерпретационная база // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 38–43.

Лапковская А.А., Сухорукова К.В., Петров А.М., Суродина И.В. Влияние продольной трещины на сигналы бокового каротажного зондирования высокоомных отложений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-"Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVII международной научной конференции (г. Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.). – Новосибирск, 2021. – Т. 2 (2). – С. 109–116. **Лимбергер Ю.А.** Трещинные коллекторы: особенности разведки и разработки // ROGTEC, Российские нефтегазовые технологии. 25 октября, 2022. URL: https://www.rogtecmagazine.com/трещинные-коллекторы-особенности-ра/?lang=ru#.

Нечаев О.В., Эпов М.И., Глинских В.Н. Единый подход к трехмерному моделированию процесса каротажа гальваническими и индукционными зондами в анизотропных средах // Геофизические технологии. – 2022. – № 3. – С. 25–33, doi: 10.18303/2619-1563-2022-3-25.

Петров А.М., Сухорукова К.В., Нечаев О.В. Совместная двумерная инверсия данных электрического и электромагнитного каротажных зондирований в анизотропных моделях песчано-глинистых отложений // Каротажник. – 2019. – № 3 (297). – С. 85–103.

Синев С.В. Механизмы, методы и способы разрушения горных пород в шарошечном бурении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 1. – С. 149–159.

Суродина И.В. Параллельные алгоритмы для решения прямых задач электрического каротажа на графических процессорах // Математические заметки СВФУ. – 2015. – № 22 (2). – С. 51–61.

Эпов М.И., Шурина Э.П., Нечаев О.В. Прямое трехмерное моделирование векторного поля для задач электромагнитного каротажа // Геология и геофизика. – 2007. – № 48 (9). – С. 989–995.

Эпов М.И., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Лапковская А.А., Леоненко А.Р., Петров А.М., Сухорукова К.В., Горносталев Д.И. Современное программно-методическое обеспечение интерпретации комплекса данных скважинной электрометрии // Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – № 12 (3S). – С. 669–682, doi: 10.5800/GT-2021-12-3s-0546.

Epov 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. – Vol. 61 (1). – P. 38–71, doi: 10.30632/PJV61N1-2020a1.

FMI – Fullbore formation microimager: брошюра из раздела "Borehole images and dip for geology, geomechanics, and 3D reservoir modeling". – Сайт фирмы Шлюмберже. Дата доступа 05.12.2023, April 2002, URL: https://www.slb.com/-/media/files/fe/brochure/fmi-br.ashx

REFERENCES

Epov M.I., Shurina E.P., Nechaev O.V. 3D forward modeling of vector field for induction logging problems // Russian Geology and Geophysics. – 2007. – Vol. 48 (9). – P. 770–774, doi: 10.1016/j.rgg.2006.05.003.

Epov 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. – Vol. 61 (1). – P. 38–71, doi: 10.30632/PJV61N1-2020a1.

Epov M.I., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Lapkovskaya A.A., Leonenko A.R., Petrov A.M., Sukhorukova K.V., Gornostalev D.I. Modern algorithms and software for interpretation of resistivity logging data // Geodynamics & Tectonophysics. – 2021. – Vol. 12 (3s). – P. 669–682, doi: 10.5800/GT-2021-12-3s-0546.

FMI – Fullbore formation microimager. April 2002, URL: https://www.slb.com/-/media/files/fe/brochure/fmi-br.ashx **Kayurov K.N., Eremin V.N., Petrov A.N., Suhorukova K.V., Nikitenko M.N., Arzhantsev V.S.** SKL hardware systems for logging in oil-gas wells and its interpretation base // Oil Industry. – 2015. – Vol. 9. – P. 38–43. Lapkovskaya A., Sukhorukova K., Petrov A., Surodina I. Longitudinal fracture influence on the unfocused lateral logging sounding responses in high-resistivity deposits. Proceedings of XVII International congress GEO-Sibir-2021. – SGUGiT, Novosibirsk, 2021. – Vol. 2 (2). – P.109–116.

Limberger Yu. Fractured Reservoirs: Specifics of Exploration and Development. ROGTECMAGAZINE, June 7, 2023. URL: https://www.rogtecmagazine.com/fractured-reservoirs-specifics-of-exploration-and-development/

Nechayev O.V., Epov M.I., Glinskikh V.N. A unified approach to three-dimensional modeling of the logging process by galvanic and induction probes in anisotropic media // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2022. – Vol. 3. – P. 25–33, doi: 10.18303/2619-1563-2022-3-25.

Petrov A.M., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V. Joint two-dimension inversion of electric and electromagnetic sounding logs in models of anisotropic sand-and-clay sediments // Karotazhnik. – 2019. – Vol. 3 (297). – P. 85–103. **Sinev S.V.** Mechanisms, methods and ways of destruction of rocks in rolerbit drilling // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2016. – Vol. 1. – P. 149–159.

Surodina I.V. Parallel GPU solvers for the solution of direct electric logging problems // Mathematical Notes of NEFU. – 2015. – Vol. 22 (2). – P. 51–61.

van Golf-Racht T.D. Fundamentals of fractured reservoir engineering, 1st Edition. – Elsevier Science, 1982. – Vol. 12. – 732 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

СУХОРУКОВА Карина Владимировна – доктор технических наук, заведующая лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: количественная интерпретация комплекса данных скважинной электрометрии в вертикальных и субгоризонтальных скважинах.

СУРОДИНА Ирина Владимировна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: математическое моделирование задач каротажа и наземного зондирования, разработка параллельных алгоритмов и программ для GPU.

НЕЧАЕВ Олег Валентинович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: моделирование электромагнитных полей в геофизических приложениях, метод конечных элементов, численные методы решения обратных задач электродинамики.

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2023 г., принята к публикации 9 января 2024 г.