

УДК 550.832.7

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАКЛОННОЙ ОДНООСНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ НА СИГНАЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М.И. Эпов^{1,2}, И.А. Москаев¹, О.В. Нечаев¹, В.Н. Глинских^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

Для исследования влияния параметров наклонной одноосной электрической анизотропии на сигналы электрического и электромагнитного каротажных зондирований выполнены их численное моделирование и сравнительный анализ в однородной и слоисто-однородной моделях. При расчетах использован алгоритм трехмерного численного моделирования сигналов скважинной электрометрии в пространственно-неоднородных моделях с наклоном главных осей тензора удельной электропроводности, основанный на методе конечных элементов. Полученные результаты указывают на потенциальную возможность более точной оценки электрофизических свойств трещиноватых карбонатных коллекторов доюрского фундамента Западной Сибири, характеризующихся наклоном главных осей тензора удельной электропроводности.

Трещиноватые карбонатные коллекторы, наклонная одноосная электрическая анизотропия, численное моделирование

EFFECT OF TILTED UNIAXIAL ELECTRICAL ANISOTROPY PARAMETERS ON SIGNALS OF ELECTRIC AND ELECTROMAGNETIC LOGGING SOUNDINGS ACCORDING TO RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION

M.I. Epov, I.A. Moskaev, O.V. Nechaev, V.N. Glinskikh

To study the effect of tilted uniaxial electrical anisotropy parameters on electric and electromagnetic logging signals, their numerical simulation and comparative analysis in homogeneous and layered models have been performed. An algorithm for three-dimensional numerical simulation of resistivity logging signals in spatially heterogeneous models with tilted principal axes of the electrical conductivity tensor, based on the finite-element method, was used in the calculations. The obtained results indicate the potential for a more accurate estimation of electrophysical properties of fractured carbonate reservoirs of the pre-Jurassic basement of West Siberia, which are characterized by the tilt of the electrical conductivity tensor principal axes.

Fractured carbonate reservoirs, tilted uniaxial electrical anisotropy, numerical simulation

ВВЕДЕНИЕ

При описании удельной электропроводности (УЭП) нефтяных коллекторов осадочного происхождения, сложенных чередующимися тонкими горизонтальными прослоями разного литологического состава (глинами и песчаниками), обычно используется и наиболее изучена трансверсально-изотропная геоэлектрическая модель среды [Альпин, 1953; Рытов, 1955; Дахнов, 1959; Табаровский и др., 1976, 1977; Табаровский, Эпов, 1979; Могилатов, 2012; Каринский, Даев, 2016; Сухорукова и др., 2017; Эпов и др., 2021]. Пласт в такой модели характеризуется значениями УЭП вдоль слоистости (горизонтальной УЭП) и коэффициента анизотропии. Вместе с тем недостаточно исследована модель трещиноватых карбонатных коллекторов, в которых электрическая анизотропия обусловлена системой направленных трещин.

В Западной Сибири наиболее перспективными в отношении нефтегазоносности карбонатных пород являются блоки органогенных и доломитизированных известняков [Вышемирский, Запивалов, 1981; Конторович и др., 2006], слагающих коллекторы палеозойского фундамента сложного трещинно-каверно-порового типа. Наличие трещиноватости в этих породах является доминирующим фактором продуктивности, поэтому ее выделение в потенциальных коллекторах является актуальной задачей.

Однако ее решение в рамках трансверсально-изотропных геоэлектрических моделей может приводить к ошибкам при интерпретации данных скважинной электрометрии ввиду того, что описание

трещиноватости в карбонатных коллекторах с помощью вышеуказанных моделей нецелесообразно, поскольку плоскости трещиноватости в этих породах располагаются не параллельно границам вмещающих пластов, а под углом к ним. Поэтому предлагается рассмотреть геоэлектрическую модель с наклонной одноосной электрической анизотропией — с углом наклона главных осей тензора УЭП.

Построение решений прямых задач скважинной электротометрии в слоистых геоэлектрических моделях с наклонной электрической анизотропией началось более 40 лет назад. В работе [Табаровский, Эпов, 1977] предложен способ определения компонент электромагнитного поля произвольного гармонического источника, основанный на представлении всех составляющих через фурье-образы его горизонтальных компонент. В публикации [Moran, Gianzero, 1979] выполнен теоретический анализ потенциала источника постоянного электрического тока с применением численных методов его оценки в слоисто-однородной геоэлектрической модели с наклонной электрической анизотропией без учета влияния скважины.

Примерно через два десятилетия появился ряд работ, посвященных программно-методическому обеспечению решения прямых и обратных задач электромагнитного каротажа в моделях с наклонной электрической анизотропией [Anderson et al., 1995; Hagiwara, 1995, 1996; Graciet, Shen, 1997], в том числе с учетом влияния скважины и проникновения фильтрата бурового раствора на сигналы зондов [Anderson et al., 1997]. Кроме того, известны результаты исследований по расширению аппаратно-методической базы: разработка приборов многокомпонентного индукционного каротажа, чувствительных к электрической анизотропии при любом наклоне скважины [Kriegshaüser et al., 2000; Page et al., 2001; Rosthal et al., 2003; Rabinovich et al., 2004; Wang et al., 2006; Zhang et al., 2007; Davydycheva, Frenkel, 2010; Hagiwara, 2010; Hu et al., 2017]. Также изучению наклонной электрической анизотропии посвящены публикации [Федоров, Эпов, 2003, 2005; Эпов и др., 2010, 2016; Каринский, 2018; Каринский, Красносельских, 2018; Nechaev et al., 2021].

В настоящей работе для оценки параметров наклонной электрической анизотропии в трещиноватых карбонатных коллекторах предлагается использовать комплекс данных стандартных методов скважинной электротометрии: высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования (ВЭМКЗ), бокового каротажного зондирования (БКЗ) и бокового каротажа (БК-3), изначально не предназначавшихся для этой цели. Необходимость комплексирования данных этих методов обусловлена различной чувствительностью к компонентам УЭП. Указанные методы широко применяются на территории Западной Сибири уже на протяжении длительного времени, что открывает возможность масштабного использования как новых, так и архивных данных при интерпретации в рамках предлагаемой геоэлектрической модели среды.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

Для численного моделирования сигналов зондов БКЗ и БК-3 введем электрический потенциал φ такой, что напряженность электрического поля $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi$. Пусть Ω — трехмерная (возможно, неоднородная по физическим свойствам) ограниченная область моделирования с липшиц-непрерывной границей. Распределение φ в этой области описывается следующей краевой задачей:

$$-\text{div } \sigma \text{ grad } \varphi = \text{div } \mathbf{J}, \quad (1)$$

$$\varphi|_{\Gamma} = 0, \quad (2)$$

где σ — удельная электрическая проводимость; Γ — граница области моделирования, на которой электрический потенциал считается равным нулю (расстояние от токового электрода до границы выбирается таким образом, чтобы оно практически не влияло на значение электрического потенциала на измерительных электродах); $\mathbf{J}$ — плотность стороннего тока в источнике.

Моделирование сигналов зондов ВЭМКЗ требует определения напряженности электрического поля, порождаемого гармоническим током, которое описывается следующей краевой задачей:

$$\text{rot } \mu^{-1} \text{ rot } \mathbf{E} + (i\omega\sigma - \omega^2\epsilon)\mathbf{E} = -i\omega\mathbf{J}, \quad (3)$$

$$\mathbf{E} \times \mathbf{n}|_{\Gamma} = 0, \quad (4)$$

где μ — магнитная проницаемость, постоянная величина; i — мнимая единица; ω — круговая частота тока в источнике; ϵ — диэлектрическая проницаемость; $\mathbf{n}$ — вектор внешней нормали к границе Γ . Необходимо отметить, что токи смещения оказывают влияние на результаты измерений зондов ВЭМКЗ, особенно в средах, обладающих не единичной относительной диэлектрической проницаемостью (в данной работе относительная диэлектрическая проницаемость принимается равной единице), поэтому соответствующее слагаемое уравнения (3) нельзя опустить.

Для решения краевых задач (1), (2) и (3), (4) будем использовать метод конечных элементов [Шайдуров, 1989; Hiptmair, 2002].

Введем следующие функциональные пространства:

$$H^1(\Omega) = \{\psi \in L^2(\Omega); \text{grad } \psi \in [L^2(\Omega)]^3\},$$

$$H_0^1(\Omega) = \{\psi \in H^1(\Omega); \psi|_{\Gamma} = 0\},$$

$$H(\text{rot}; \Omega) = \{\mathbf{v} \in [L^2(\Omega)]^3; \text{rot } \mathbf{v} \in [L^2(\Omega)]^3\},$$

$$H_0(\text{rot}; \Omega) = \{\mathbf{v} \in H(\text{rot}; \Omega); \mathbf{v} \times \mathbf{n}|_{\Gamma} = 0\},$$

где $L^2(\Omega)$ — пространство Лебега.

Для элементов введенных пространств определим следующее скалярное произведение:

$$(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} \, d\Omega.$$

Для краевой задачи (1)—(2) сформулируем вариационную постановку [Шайдуров, 1989]: найти $\varphi \in H_0^1(\Omega)$ такое, что $\forall \psi \in H_0^1(\Omega)$ выполняется:

$$\int_{\Omega} \text{grad } \varphi \cdot (\sigma \text{ grad } \psi) d\Omega = \int_{\Omega} \text{div } \mathbf{J} \cdot \psi d\Omega. \quad (5)$$

Для краевой задачи (3), (4) сформулируем вариационную постановку [Hiptmair, 2002]: найти $\mathbf{E} \in H_0(\text{rot}; \Omega)$ такое, что $\forall \mathbf{v} \in H_0(\text{rot}; \Omega)$ выполняется:

$$\int_{\Omega} \mu^{-1} \text{rot } \mathbf{E} \cdot \text{rot } \mathbf{v} \, d\Omega + \int_{\Omega} (i\omega\sigma - \omega^2\varepsilon) \mathbf{E} \cdot \mathbf{v} \, d\Omega = - \int_{\Omega} i\omega \mathbf{J} \cdot \mathbf{v} \, d\Omega. \quad (6)$$

Для построения дискретного аналога введенных вариационных задач (5) и (6) будем аппроксимировать пространства $H_0^1(\Omega)$ и $H_0(\text{rot}; \Omega)$ дискретными подпространствами. Подпространство скалярных функций построено при помощи Лагранжевых элементов третьего порядка на тетраэдральной сетке [Webb, 1999], подпространство векторных функций определено на элементах Неделека третьего порядка на тетраэдральной сетке [Webb, 1999]. В качестве метода решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), получаемых после дискретизации задачи (5), будем использовать метод сопряженных градиентов, в качестве метода предобуславливания будет выступать неполное разложение Холецкого [Saad, 2003]. Решение СЛАУ с комплексной симметричной матрицей для (6) будет осуществляться при помощи symmetric QMR [Freund, Nachtigal, 1995] с диагональным предобуславливанием.

Трансверсально-изотропная геоэлектрическая модель среды характеризуется диагональным тензором УЭП:

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_v \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где σ_h и σ_v — тангенциальная и нормальная компоненты тензора УЭП соответственно.

Она описывает тонкие прослои, кровля и подошва которых параллельны плоскостям напластования. Однако под влиянием различных геологических факторов нормаль к границам анизотропных пластов может не совпадать с нормалью к образующим породу структурам. Такими породами являются палеозойские трещиноватые карбонатные коллекторы, для которых наличие эффекта электрической анизотропии обусловлено системой субвертикальных трещин. В таком случае среда описывается моделью с наклонной электрической анизотропией. Соответственно, тензор УЭП для этой модели характеризуется наклоном главных осей и имеет следующий вид:

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h \cos(\theta) \cos(\theta) + \sigma_v \sin(\theta) \sin(\theta) & \sigma_v \cos(\theta) \sin(\theta) - \sigma_h \sin(\theta) \cos(\theta) \\ 0 & \sigma_v \cos(\theta) \sin(\theta) - \sigma_h \sin(\theta) \cos(\theta) & \sigma_v \cos(\theta) \cos(\theta) + \sigma_h \sin(\theta) \sin(\theta) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где θ — угол наклона главных осей тензора УЭП ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$). Физический смысл угла θ состоит в том, что он равен углу наклона оси каротажного прибора относительно локальной системы координат, в которой тензор УЭП является диагональным (рис. 1, а).

Более того, при достаточно больших значениях зенитного угла скважины горизонтально-слоистая среда с чередующимися тонкими прослоями глин и песчаников также может быть описана тензором УЭП с наклоном главных осей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Для оценки влияния угла наклона главных осей тензора УЭП на данные скважинной электрометрии выполнено численное моделирование разности фаз, отношения амплитуд для зондов ВЭМКЗ и кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) для зондов БКЗ, БК-3 в различных геоэлектрических моделях.

Схемы с геометрией системы наблюдения для зондов ВЭМКЗ, БКЗ и БК-3 представлены на рис. 1, б—г, а также приводятся параметры зондов ВЭМКЗ (таблица). Расстояние в метрах между электродами зонда БКЗ указывается в названии зонда (например, А4.0М0.5N). Точка привязки для каждого зонда ВЭМКЗ соответствует положению его дальней приемной катушки R_2 , для зондов БКЗ — располагается между измерительными электродами.

Модель анизотропного пласта. Для однородной геоэлектрической модели с наклонной электрической анизотропией проведены расчеты сигналов скважинной электрометрии в зависимости от значений модельных параметров: тангенциальной УЭП σ_h , коэффициента анизотропии λ ($\lambda^2 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$) и зенитного угла наклона главных осей тензора УЭП θ .

Результаты моделирования сигналов в однородной модели представлены в виде отношения сигнала в анизотропной модели с изменяющимся углом θ к сигналу в анизотропной модели с нулевым углом θ (наоборот, для разностей фаз ВЭМКЗ) (рис. 2). Они отображают относительное изменение сигнала в зависимости от зенитного угла наклона главных осей тензора УЭП.

Для расчетов были выбраны следующие значения параметров модели: тангенциальной УЭП — $\left\{ \frac{1}{5}, \frac{1}{25}, \frac{1}{50}, \frac{1}{100}, \frac{1}{250}, \frac{1}{500} \right\}$ См/м, коэффициента анизотропии — $\{1, \sqrt{2}, 2, 2\sqrt{2}, 4\}$, зенитного угла θ — $\{0, 15, 30, 45, 60, 75, 90\}^\circ$. При различных значениях тангенциальной УЭП модели, а также для

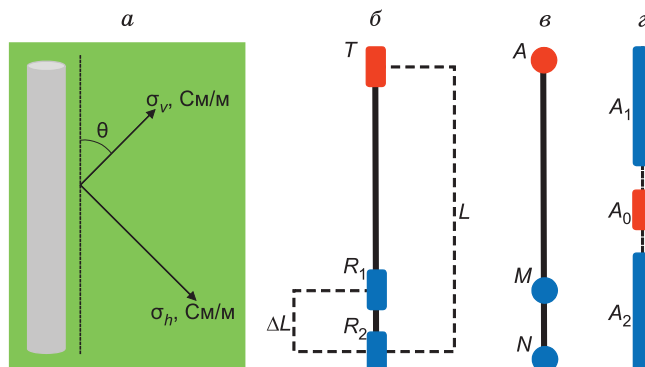
разных зондов ВЭМКЗ сигналы изменяются аналогично представленным (см. рис. 2), поэтому иллюстрации не приводятся.

Из анализа результатов численного моделирования следует, что в рамках однородной анизотропной модели трещиноватого карбонатного коллектора при увеличении угла наклона главных осей тензора УЭП от 0 до 90° разность фаз ВЭМКЗ изменяется до 5 раз, кажущееся УЭС БК-3 — до 2.5 раз. При этом изменение отношения амплитуд ВЭМКЗ незначительное — до 2 %, вследствие чего диаграммы отношения амплитуд в работе не требуются. Отметим, что с увеличением коэффициента анизотропии усиливается влияние угла θ на сигналы ВЭМКЗ и БК-3.

Модель анизотропного пласта со скважиной. Выполнены расчеты сигналов для геоэлектрической модели пласта с наклонной электрической анизотропией, вскрытого скважиной. Рассматриваемая модель соответствует реальным геологическим обстановкам Западной Сибири: терригенному коллектору, состоящему из чередующихся тонких прослоев глин и песчаников, а также трещиноватому карбонатному коллектору, сложенному органогенными и доломитизированными известняками. По результа-

Рис. 1. Геоэлектрическая модель с наклоном главных осей тензора УЭП и каротажный прибор в ее пределах (а); схемы с геометрией системы наблюдения (б—г):

б — зонд ВЭМКЗ: T — генераторная катушка, установленная соосно прибору и приемным катушкам R_1 и R_2 , L — длина зонда, ΔL — база зонда (расстояние между приемными катушками); в — зонд БКЗ: A — токовый электрод, M и N — измерительные электроды; г — зонд БК-3: A_0 — центральный электрод, A_1 и A_2 — экранные электроды.



Параметры зондов ВЭМКЗ

Название зонда	Длина зонда L , м	База зонда ΔL , м	Рабочая частота зонда, МГц
DF05	0.50	0.10	14
DF07	0.70	0.14	7
DF10	1.00	0.20	3.5
DF14	1.41	0.28	1.75
DF20	2.00	0.40	0.88

Примечание. В работе рассматриваются сигналы зондов ВЭМКЗ основной изопараметрической группы.

там анализа определяется влияние наклона главных осей тензора УЭП анизотропного пласта и скважины на сигналы зондов ВЭМКЗ, БКЗ и БК-3.

Результаты численного моделирования сигналов ВЭМКЗ (рис. 3), БКЗ и БК-3 (рис. 4) приводятся в виде отношения сигнала в модели, включающей в себя анизотропный пласт с изменяющимся углом θ , к сигналу в модели с трансверсально-изотропным пластом (наоборот, для разностей фаз ВЭМКЗ). Аналогично случаю с однородной моделью такой вид кривых отражает влияние угла θ анизотропного пласта на сигналы скважинной электрометрии.

При расчетах используются следующие значения параметров геоэлектрических моделей: для скважины — УЭП $\sigma_c = \frac{1}{2}$ См/м, радиус $r_c = 0.108$ м, для песчано-глинистого коллектора — $\sigma_h = \frac{1}{7}$ См/м, $\lambda = 1.6$, для трещиноватого карбонатного коллектора — $\sigma_h = \frac{1}{50}$ См/м, $\lambda = 4$. Такие значения параметров являются характерными для геоэлектрических моделей, описывающих данные типы коллекторов. Значения зенитного угла наклона главных осей тензора УЭП приняты равными: $\theta = \{0, 15, 30, 45, 60, 75, 90\}^\circ$.

Из анализа результатов численного моделирования следует, что аналогично однородной модели при увеличении угла наклона главных осей тензора УЭП от 0 до 90° изменение разности фаз ВЭМКЗ составляет до 1.6 раза в терригенном коллекторе и до 5 раз в трещиноватом карбонатном коллекторе; изменение кажущегося УЭС БКЗ — до 1.6 раза в терригенном коллекторе и примерно до 4.5 раза в трещиноватом карбонатном коллекторе; изменение кажущегося УЭС БК-3 примерно до 1.3 раза в терригенном коллекторе и до 2.5 раза в трещиноватом карбонатном коллекторе. Отношение амплитуд ВЭМКЗ при этом изменяется слабо: до 5 % в терригенном коллекторе и до 2 % в трещиноватом карбонатном коллекторе (иллюстрации не приводятся).

На графиках (см. рис. 3) видно, что влияние угла θ при его значениях в диапазоне примерно до 60° на разность фаз ВЭМКЗ в целом одинаково для разных зондов. Однако при больших величинах угла θ его влияние на разность фаз ВЭМКЗ заметно меньше для короткого зонда DF05, чем для более длинных. Указанная закономерность более выражена для трещиноватого карбонатного, чем для песчано-глинистого коллектора.

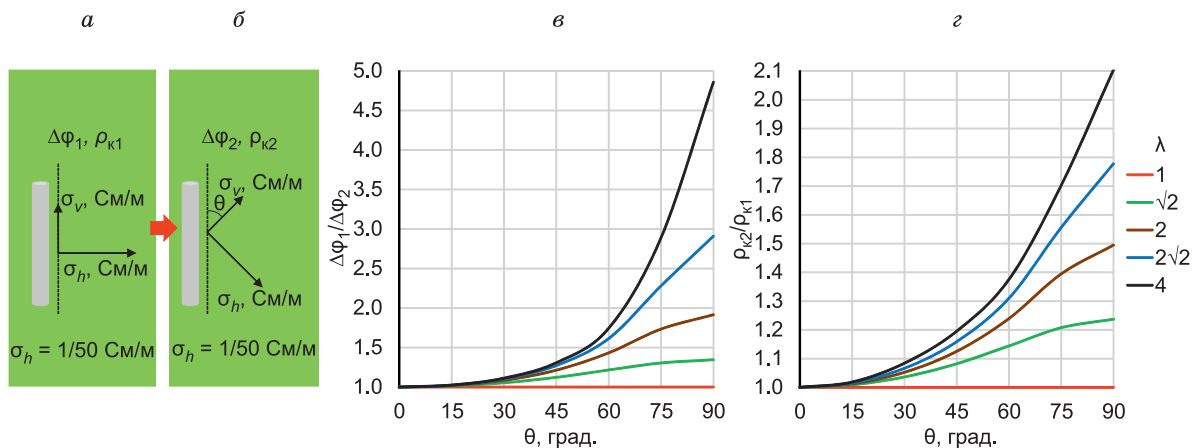


Рис. 2. Анизотропные геоэлектрические модели трансверсально-изотропная (а) и с наклоном главных осей тензора УЭП (б); изменения разности фаз зонда DF10 ВЭМКЗ (в) и кажущегося УЭС БК-3 (г) в зависимости от коэффициента анизотропии и угла наклона главных осей тензора УЭП.

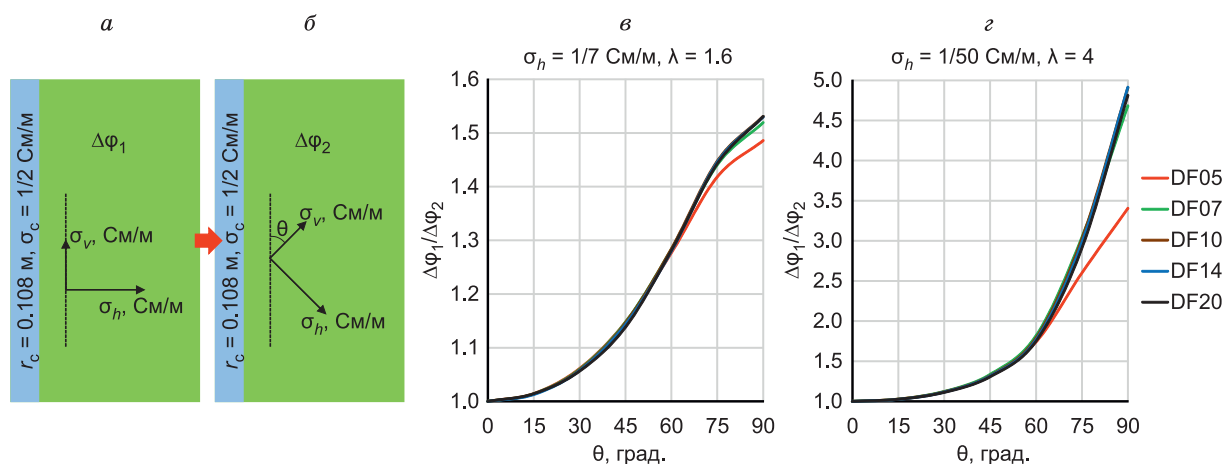


Рис. 3. Геоэлектрические модели transversально-изотропного пласта со скважиной (а), пласта с наклонной электрической анизотропией и со скважиной (б); изменение разности фаз зондов ВЭМКЗ для моделей терригенного (в) и трещиноватого карбонатного (з) коллекторов в зависимости от угла наклона главных осей тензора УЭП.

Влияние угла θ на значения кажущихся УЭС (см. рис. 4) длинных зондов А4.0М0.5N и А8.0М1.0N БКЗ больше, чем на кажущиеся УЭС коротких зондов А1.0М0.1N и А0.4М0.1N БКЗ и зонда БК-3. Следовательно, влияние угла θ на сигналы различных зондов БКЗ проявляется по-разному при значениях угла θ от 0 до 90°, в отличие от метода ВЭМКЗ, для которого различие проявляется лишь при величинах угла θ в диапазоне от 60 до 90°. Более того, видно, что кажущееся УЭС длинных зондов БКЗ увеличивается примерно в λ раз при изменении значения угла θ от 0 до 90° как для терригенного, так и карбонатного коллекторов (см. рис. 4).

Проанализируем влияние скважины в геоэлектрической модели пласта с наклонной электрической анизотропией. Результаты численного моделирования сигналов БКЗ и БК-3 (рис. 5) представлены в виде отношения сигнала в модели анизотропного пласта с изменяющимся углом θ и со скважиной к сигналу в модели анизотропного пласта с тем же значением угла θ , но без скважины. Такой вид отображения данных позволяет судить о влиянии скважины на рассматриваемые сигналы.

Из анализа графиков (см. рис. 5) следует, что влияние скважины на кажущееся УЭС длинных, среднего А2.0М0.5N и короткого А1.0М0.1N зондов БКЗ в большей степени зависит от угла θ пласта, чем влияние скважины на кажущееся УЭС короткого зонда А0.4М0.1N БКЗ и зонда БК-3.

В целом влияние скважины на разность фаз и отношение амплитуд ВЭМКЗ слабо зависит от угла θ , поэтому соответствующих иллюстраций не требуется. Однако степень влияния скважины на раз-

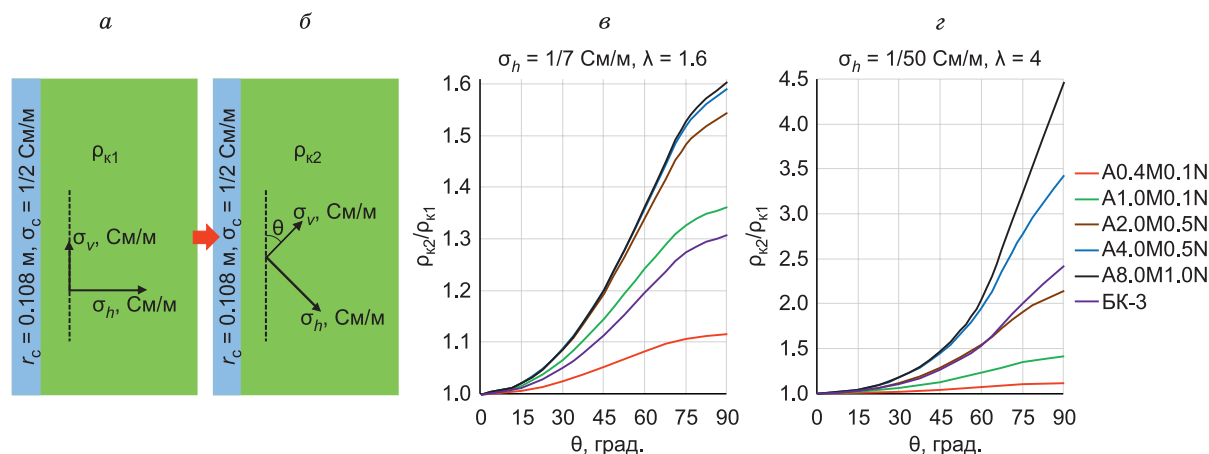


Рис. 4. Геоэлектрические модели transversально-изотропного пласта со скважиной (а), пласта с наклонной электрической анизотропией и со скважиной (б); изменения кажущихся УЭС зондов БКЗ и БК-3 для моделей терригенного (в) и трещиноватого карбонатного (з) коллекторов в зависимости от угла наклона главных осей тензора УЭП.

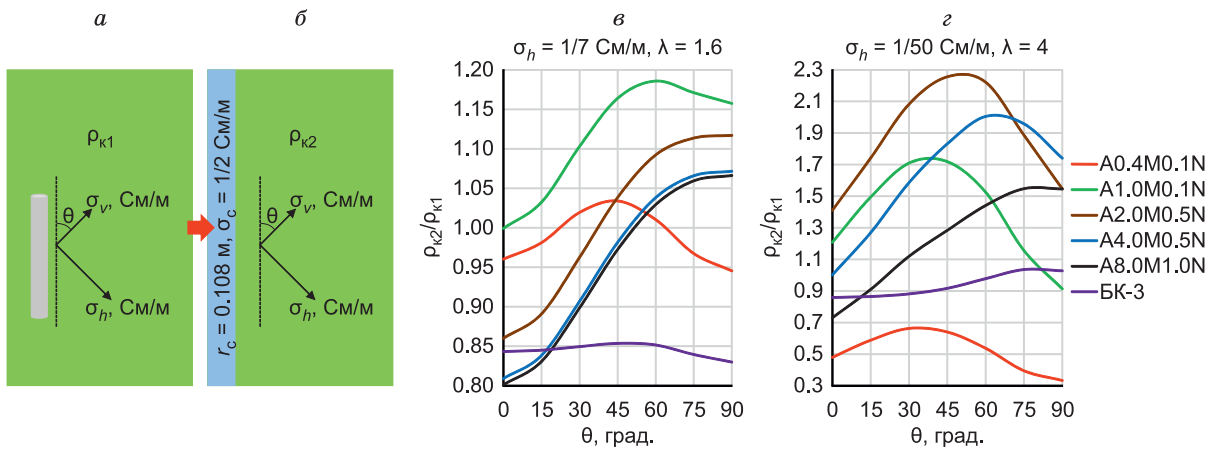


Рис. 5. Геоэлектрические модели пласта с наклонной электрической анизотропией без скважины (а), пласта с наклонной электрической анизотропией и со скважиной (б); изменения кажущихся УЭС зондов БКЗ и БК-3 для моделей терригенного (в) и трещиноватого карбонатного (г) коллекторов в зависимости от угла наклона главных осей тензора УЭП.

ность фаз короткого зонда DF05 ВЭМКЗ может достигать примерно 30 % при высоких значениях угла θ в модели трещиноватого карбонатного коллектора.

Модель анизо- и изотропного пластов со скважиной. Рассмотрим геоэлектрическую модель перекрывающего изотропного пласта и подстилающего пласта с наклонной электрической анизотропией, вскрытых скважиной. Такая модель соответствует реальной геологической обстановке Западной Сибири: трещиноватому карбонатному коллектору, перекрытому глинисто-кремнистой корой выветривания [Конторович и др., 2018]. Определяется влияние наклона главных осей тензора УЭП анизотропного пласта модели на кажущееся УЭС БКЗ в зависимости от вертикального положения зондов в скважине (рис. 6).

Для расчетов используются значения параметров геоэлектрической модели: для скважины $\sigma_c = \frac{1}{2}$ См/м, $r_c = 0.108$ м, для изотропного пласта УЭП $\sigma = \frac{1}{8}$ См/м, $\lambda = 1$, для анизотропного пласта $\sigma_h = \frac{1}{50}$ См/м, $\lambda = 4$, $\theta = \{0, 15, 30, 45, 60, 75, 90\}^\circ$. Шаг по глубине составляет 0.2 м.

Расчеты показывают, что для синтетических диаграмм зондов А4.0М0.5Н и А8.0М1.0Н БКЗ (см. рис. 6) в модели с трансверсально-изотропным пластом (при $\theta = 0^\circ$) характерен рост значений ρ_k ,

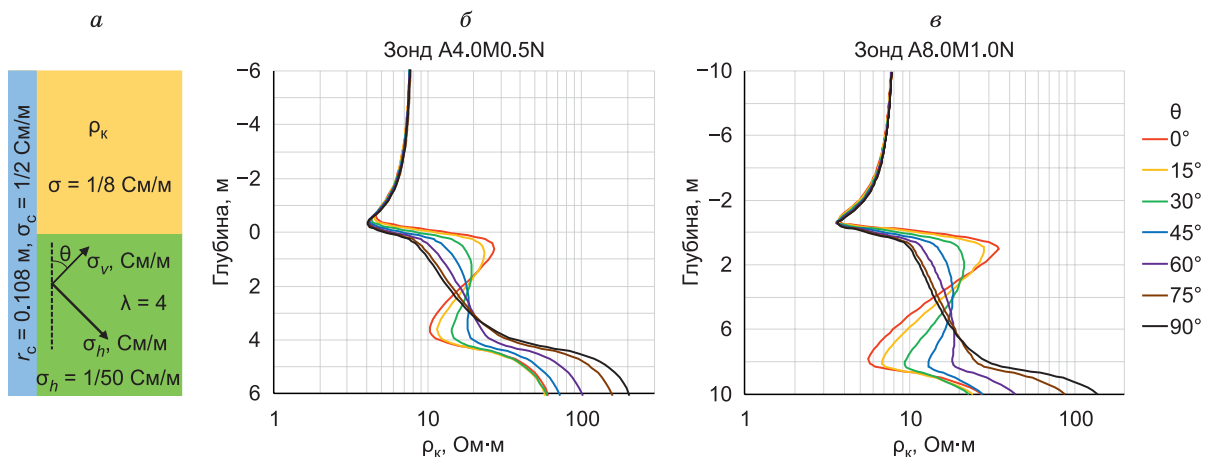


Рис. 6. Геоэлектрическая модель перекрывающего изотропного пласта и подстилающего пласта с наклонной электрической анизотропией, вскрытых скважиной (а); кажущиеся УЭС зондов А4.0М0.5Н БКЗ (б) и А8.0М1.0Н БКЗ (в) в зависимости от вертикальной глубины и угла наклона главных осей тензора УЭП.

начинающийся в точке минимума на расстоянии длины зонда под границей и монотонно продолжающийся до достижения максимума в области границы. Однако при постепенном увеличении угла θ синтетические диаграммы меняют свою форму: указанные минимум и максимум становятся менее выраженными и, таким образом, при $\theta = 90^\circ$ они не наблюдаются на кривых ρ_k .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для данной работы не была поставлена цель выбора метода решения СЛАУ, оптимального по времени, поэтому скорость расчетов не учитывалась, а также цель освещения самого процесса моделирования и особенностей, связанных непосредственно с вычислительными методами, вследствие чего сопутствующая информация по возможности опускается. Подробное описание использования вычислительных методов может быть предметом для отдельной статьи.

По результатам численного моделирования определено влияние параметров наклонной одноосной электрической анизотропии на сигналы методов скважинной электрометрии. С помощью вычислительного алгоритма, основанного на методе конечных элементов, проведен анализ сигналов ВЭМКЗ, БКЗ и БК-3 в зависимости от тангенциальной и нормальной УЭП и угла наклона главных осей тензора УЭП в однородной и слоисто-однородной моделях.

Из анализа результатов численного моделирования следует, что при увеличении угла θ от 0° до 90° изменение разности фаз ВЭМКЗ достигает до 1.6 и 5.0 раз, кажущегося УЭС БКЗ — 1.6 и 4.5 раза, кажущегося УЭС БК-3 — 1.3 и 2.5 раза для моделей терригенного и трещиноватого карбонатного коллекторов соответственно. Отношение амплитуд ВЭМКЗ при этом изменяется слабо. Вместе с тем погрешность измерений разности фаз методом ВЭМКЗ может составлять до 6 % для терригенного и до 70 % для трещиноватого карбонатного коллектора, кажущегося УЭС метода БКЗ — до 10 %, кажущегося УЭС БК-3 — до 20 % для обоих типов коллекторов. Таким образом, по результатам расчетов эффект наклонной одноосной электрической анизотропии превышает погрешность измерений для разности фаз ВЭМКЗ в 25 раз в модели терригенного коллектора, в 7 раз и более в модели трещиноватого карбонатного коллектора, для кажущегося УЭС БКЗ — в 16 раз и более, для кажущегося УЭС БК-3 — в 6 раз и более для обоих типов коллекторов.

При значениях угла θ менее 60° его влияние на разность фаз ВЭМКЗ примерно одинаково для разных зондов, однако при больших величинах θ его влияние заметно меньше для короткого зонда DF05, чем для более длинных зондов, особенно в модели трещиноватого карбонатного коллектора. Угол θ в большей мере влияет на кажущееся УЭС длинных зондов БКЗ, чем на кажущееся УЭС коротких зондов БКЗ и зонда БК-3. В целом влияние скважины на кажущееся УЭС сильнее зависит от угла θ для более длинных зондов БКЗ, чем для короткого зонда A0.4M0.1N БКЗ и зонда БК-3. Кроме того, установлено, что при постепенном увеличении угла θ от 0 до 90° минимум ρ_k , особенно характерный для длинных зондов БКЗ и присутствующий на синтетических диаграммах на расстоянии длины зонда под границей, а также максимум в области границы становятся все менее выраженными и, таким образом, при $\theta = 90^\circ$ не наблюдаются на рассчитанных кривых ρ_k .

Научная новизна работы заключается в исследовании класса моделей с наклонной электрической анизотропией путем численного моделирования сигналов отечественных методов скважинной электрометрии. Согласно расчетам, данные электрического и электромагнитного каротажных зондирований достаточно чувствительны к значению угла наклона главных осей тензора УЭП модели для вовлечения этого параметра в инверсию, что позволит повысить достоверность интерпретации данных.

Результаты исследования указывают на потенциальную возможность определения параметров наклонной одноосной электрической анизотропии по комплексу данных стандартных методов электрометрии, что является чрезвычайно важным по следующим причинам. Во-первых, это создает условия для более точной оценки электрофизических свойств трещиноватых карбонатных коллекторов доюрского фундамента. Во-вторых, становится возможной переинтерпретация архивных материалов в рамках предлагаемой геоэлектрической модели для вовлечения в запасы дополнительных коллекторов трещиноватого типа.

Научно-исследовательские работы выполнены в рамках проекта FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

ЛИТЕРАТУРА

Альпин Л.М. Сеточное моделирование каротажа сопротивлений // Прикладная геофизика, 1953, вып. 10, с. 48–73.

Вышемирский В.С., Запивалов Н.П. Нефтегазоносность палеозоя юго-востока Западно-Сибирской плиты // Нефтегазоносность Сибири и Дальнего Востока, 1981, вып. 513, с. 90—105.

- Дахнов В.Н.** Промысловая геофизика. Методы промысловой геофизики, аппаратура и оборудование, электрические методы исследования скважин. М., Гостоптехиздат, 1959, 697 с.
- Каринский А.Д.** Электромагнитное поле в моделях электрически анизотропной среды. М., ГЕОС, 2018, 184 с.
- Каринский А.Д., Даев Д.С.** Математическое моделирование на основе решения прямой задачи каротажа сопротивления при произвольном положении токового электрода в скважине и анизотропии среды // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (10), с. 1875–1884, doi: 10.15372/GiG20161007.
- Каринский А.Д., Красносельских А.А.** Математическое и физическое моделирование с целью обоснования нового геофизического метода — каротажа электрической анизотропии // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (9), с. 1481–1491, doi: 10.15372/GiG20180912.
- Конторович В.А., Бердникова С.А., Калинина Л.М., Лапковский В.В., Поляков А.А., Соловьев М.В.** Модель геологического строения и нефтегазоносность зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений в Чузиско-Чижанской зоне нефтегазоаккумуляции // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2006, № 5–6, с. 91–102.
- Конторович В.А., Калинина Л.М., Калинин А.Ю., Соловьев М.В.** Нефтегазоперспективные объекты палеозоя Западной Сибири, сейсмогеологические модели эталонных месторождений // Геология нефти и газа, 2018, № 4, с. 5–15, doi: 10.31087/0016-7894-2018-4-5-15.
- Могилатов В.С.** Формирование макроанизотропных геоэлектрических параметров тонкослойной геологической среды и разрешающая способность электроразведки // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (5), с. 633–640.
- Рытов С.М.** Электромагнитные свойства мелкослойной среды // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1955, т. 29, № 5, с. 605–616.
- Сухорукова К.В., Петров А.М., Нечаев О.В.** Численная инверсия данных электрокаротажа в интервалах анизотропных глинистых отложений // Каротажник, 2017, № 4, с. 34–48.
- Табаровский Л.А., Эпов М.И.** Электромагнитные поля гармонических источников в слоистых анизотропных средах // Геология и геофизика, 1977 (1), с. 101–109.
- Табаровский Л.А., Эпов М.И.** Радиальные характеристики индукционных фокусирующих зондов с поперечными датчиками в анизотропной среде // Геология и геофизика, 1979 (7), с. 96–110.
- Табаровский Л.А., Каганский А.М., Эпов М.И.** Электромагнитное поле гармонического источника в анизотропной цилиндрически-слоистой среде // Геология и геофизика, 1976 (3), с. 94–99.
- Табаровский Л.А., Эпов М.И., Каганский А.М.** Фокусирующие системы индукционного каротажа в анизотропных средах // Геология и геофизика, 1977, т. 18 (9), с. 105–113.
- Федоров А.И., Эпов М.И.** Переменное электромагнитное поле в наклонно-анизотропной слоистой среде // Сибирский журнал индустриальной математики, 2003, т. 6, № 4, с. 119–131.
- 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.
- Шайдуров В.В.** Многосеточные методы конечных элементов. М., Наука, 1989, 288 с., doi: 10.1007/978-94-015-8527-9.
- Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Федоров А.И.** Влияние наклонной анизотропии электропроводности на данные частотных и нестационарных индуктивных электромагнитных зондирований // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (3), с. 401–407.
- Эпов М.И., Никитенко М.Н., Сухорукова К.В., Глинских В.Н.** Исследование возможностей электрического и электромагнитного каротажа в электрически макроанизотропных пластах, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // Каротажник, 2016, № 2, с. 64–79.
- 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 электростратиграфии // Геодинамика и тектонофизика, 2021, т. 12, № 3S, с. 669–682, doi: 10.5800/GT-2021-12-3s-0546.
- Anderson B.I., Barber T.D., Lüling M.G.** The response of induction tools to dipping, anisotropic formations // SPWLA 36th Annu. Logging Symp. Trans. Paris, SPWLA, 1995, Pap. D, p. 1–12.
- Anderson B.I., Druskin V., Lee P., Lüling M.G., Schoen E., Tabanou J., Wu P., Davydycheva S., Knizhnerman L.** Modeling 3D effects on 2-MHz LWD resistivity logs // SPWLA 38th Annu. Logging Symp. Trans. Houston, TX, SPWLA, 1997, Pap. N, p. 1–14.
- Davydycheva S., Frenkel M.A.** Review of 3D EM modeling and interpretation methods for triaxial induction and propagation resistivity well logging tools // PIERS Proc. Cambridge, PIERS, 2010, p. 390–396.
- Freund R.W., Nachtigal N.M.** Software for simplified Lanczos and QMR algorithms // Appl. Numer. Math., 1995, v. 19, p. 319–341, doi: 10.1016/0168-9274(95)00089-5.

- Graciet S., Shen L.C.** Simulation of induction and MWD resistivity tools in anisotropic dipping beds // SPWLA 38th Annu. Logging Symp. Trans. Houston, TX, SPWLA, 1997, Pap. M, p. 1—14.
- Hagiwara T.** Anisotropic shale and induction log shoulder bed corrections for deviated boreholes // SPWLA 36th Annu. Logging Symp. Trans. Paris, SPWLA, 1995, Pap. Z, p. 1—12.
- Hagiwara T.** A new method to determine horizontal-resistivity in anisotropic formations without prior knowledge of relative dip // SPWLA 37th Annu. Logging Symp. Trans. New Orleans, LA, SPWLA, 1996, Pap. Q, p. 1—8.
- Hagiwara T.** Determination of dip and anisotropy from multi-frequency tri-axial induction measurements // PIERS Online, 2010, v. 6 (5), p. 445—449.
- Hiptmair R.** Finite elements in computational electromagnetism // *Acta Numer.*, 2002, v. 11, p. 237—339, doi: 10.1017/S0962492902000041.
- Hu Y., Wang G.L., Liang L., Abubakar A.** Estimation of reservoir parameters from inversion of triaxial induction data constrained by mud-filtrate invasion modeling // *IEEE J. Multiscale Multiphys. Comput. Tech.*, 2017, v. 2, p. 228—236, doi: 10.1109/JMMCT.2017.2787652.
- Kriegshäuser B., Fanini O., Forgang S., Itskovich G., Rabinovich M., Tabarovsky L., Yu L., Epov M., v. d. Horst J.** A new multicomponent induction logging to resolve anisotropic formation // SPWLA 41st Annu. Logging Symp. Trans. Dallas, TX, SPWLA, 2000, Pap. D, p. 1—14.
- Moran J.H., Gianzero S.** Effects of formation anisotropy on resistivity-logging measurements // *Geophysics*, 1979, v. 44 (7), p. 1266—1286, doi: 10.1190/1.1441006.
- 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 // *J. Inverse Ill-Posed Probl.*, 2021, v. 29 (2), p. 295—304, doi: 10.1515/jiip-2020-0120.
- Page G.C., Fanini O.N., Kriegshäuser B.F., Mollison R.A., Yu, L., Colley, N.** Field example demonstrating a significant increase in calculated gas-in-place: An enhanced shaly sand reservoir characterisation model utilizing 3DEX multicomponent induction data // *SPE Annu. Tech. Conf. Exhibition. Proc.* New Orleans, LA, SPE, 2001, p. 1—14, doi: 10.2118/71724-MS.
- Rabinovich M., Bessalov A., Corley B., Merchant G., Wang T., Quint E., Morrison J.** Effect of fractures on multi-component and multiarray induction logs // SPWLA 45th Annu. Logging Symp. Trans. Noordwijk, Netherlands, SPWLA, 2004, Pap. UU, p. 1—16.
- Rosthal R., Barber T., Bonner S., Chen K.-C., Davydycheva S., Hazen G., Homan D., Kibbe C., Minerbo G., Schlein R., Villegas L., Wang H., Zhou F.** Field test results of an experimental fully-triaxial induction tool // SPWLA 44th Annu. Logging Symp. Trans. Galveston, TX, SPWLA, 2003, Pap. QQ, p. 1—14.
- Saad Y.** Iterative methods for sparse linear systems. 2nd ed. Philadelphia, PA, SIAM, 2003, 520 p., doi: 10.1137/1.9780898718003.
- Wang H., Barber T., Morriss C., Rosthal R., Hayden R., Markley M.** Determining anisotropic formation resistivity at any relative dip using a multiarray triaxial induction tool // *SPE Annu. Tech. Conf. Exhibition. Proc.* San Antonio, TX, SPE, 2006, p. 1—13, doi: 10.2118/103113-MS.
- Webb J.P.** Hierarchical vector basis functions of arbitrary order for triangular and tetrahedral finite elements // *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1999, v. 47 (8), p. 1244—1253, doi: 10.1109/8.791939.
- Zhang Z., Akinsamni O., Ha K.-T., Bourgeois T., Jock S., Blumhagen C., Stromberg S.** Triaxial induction logging — an operator's perspective // SPWLA 48th Annu. Logging Symp. Trans. Austin, TX, SPWLA, 2007, Pap. Y, p. 1—16.