



УЧЕТ НАКЛОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ СКВАЖИННОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПО МАТЕРИАЛАМ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

И.А. Москаев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

e-mail: MoskaevIA@ipgg.sbras.ru

Рассмотрены особенности и основные выводы публикаций, посвященных исследованию трансверсально-изотропных геоэлектрических моделей среды, характеризующихся наклоном оси электрической анизотропии относительно скважинного прибора. Такие модели могут описываться как горизонтальным и вертикальным удельными электропроводностями (либо обратными им величинами – удельными сопротивлениями) с ненулевым зенитным углом наклона каротажного прибора, так и тензором удельной электропроводности с наклоном главных осей.

Удельное электрическое сопротивление; удельная электропроводность; электромагнитный каротаж; электрический каротаж; трансверсально-изотропная модель; относительный наклон оси электрической анизотропии

ACCOUNTING FOR TILTED ELECTRICAL ANISOTROPY IN NUMERICAL SIMULATION AND INTERPRETATION OF RESISTIVITY LOGGING DATA (ANALYTICAL REVIEW BASED ON NATIONAL AND FOREIGN LITERATURE)

I.A. Moskaev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

e-mail: MoskaevIA@ipgg.sbras.ru

Features and main conclusions of publications devoted to the study of medium transverse-isotropic geoelectric models which are characterized by inclination of the electrical anisotropy axis relative to a logging tool are reviewed in this article. Such models can be defined either by horizontal and vertical conductivities (or their reciprocals, called resistivities) with a non-zero dip of a logging tool or by the conductivity tensor with the tilt of the principal axes.

Resistivity; conductivity; electromagnetic logging; electric logging; transverse-isotropic model; relative tilt of the electrical anisotropy axis

ВВЕДЕНИЕ

В среднем для осадочных пород характерна слоистость, обусловленная небольшими вариациями гранулярного и минерального состава осаждаемых частиц, и в этом случае пласты характеризуются одинаковой удельной электропроводностью (или удельным электрическим сопротивлением – УЭС) в любом направлении в плоскости слоистости и отличной – обычно меньшей – в нормальном направлении. В западносибирских меловых отложениях наибольшая анизотропия определяется для относительно

однородных глинистых пластов, что обусловлено квазигоризонтальной ориентацией под литостатическим давлением уплощенных частиц и кристаллов глинистых минералов, меньшая или ее отсутствие – для песчаных отложений. Если причиной электрической анизотропии породы является ориентация частиц и строение порового пространства между ними, вводят понятие микроанизотропии, если причина в чередовании тонких прослоев пород с разной электропроводностью, которое можно зафиксировать каким-либо зондом небольшого размера, то говорят о макроанизотропии [Сухорукова, Петров, 2021]. При этом как микроанизотропную, так и макроанизотропную среды для зондов большой длины можно описывать анизотропной геоэлектрической моделью.

В некоторых случаях условия осадконакопления приводили к формированию косослоистых пластов. Основные границы такого пласта являются горизонтальными, но между ними располагается чередование тонких прослоев разного гранулярного и минерального состава. Подобное строение рассматривается для некоторых юрских и ачимовских коллекторов Западной Сибири. Другой вариант наклонно-анизотропных отложений – это карбонатные пласты с наклонной системой микротрещин. В связи с тем, что в последние пару десятилетий в разработку вовлекаются экономически невыгодные ранее коллекторы сложного строения, усиливаются требования к достоверности оценки параметров косослоистых коллекторов. В силу трехмерности постановки как аналитическое, так и численное решения прямой задачи скважиной электрометрии оказываются достаточно сложными и ресурсоемкими. При этом построение аналитических решений прямых задач скважинной электрометрии в слоистых геоэлектрических моделях терригенных отложений с наклонной электрической анизотропией началось более 40 лет назад. Цель работы состоит в том, чтобы кратко описать основные этапы исследования геоэлектрических моделей сред с относительным наклоном между осью анизотропии и осью каротажного прибора с помощью анализа отечественных и зарубежных публикаций.

ИЗУЧЕНИЕ НАКЛОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ

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. Источник расположен в одном из пластов слоистой среды с плоскопараллельными границами, в каждом из пластов задается свой тензор удельной электропроводности (УЭП) с ненулевым углом наклона главных осей (скважина не учитывается):

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \gamma_h & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_h \cos^2(\theta) + \gamma_v \sin^2(\theta) & (\gamma_h - \gamma_v) \cos(\theta) \sin(\theta) \\ 0 & (\gamma_h - \gamma_v) \cos(\theta) \sin(\theta) & \gamma_h \sin^2(\theta) + \gamma_v \cos^2(\theta) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\hat{\sigma}$ – тензор удельной электропроводности пласта в земной системе координат, γ_h , γ_v – горизонтальная и вертикальная компоненты удельной электропроводности пласта в системе координат главных осей анизотропии, θ – угол наклона главных осей тензора удельной электропроводности.

Теоретический анализ потенциала источника постоянного электрического тока в геоэлектрической модели, состоящей из двух полупространств с произвольно ориентированными главными осями тензоров электропроводности и также произвольно ориентированной плоской границей между ними представлен в статье [Moran, Gianzero, 1979]. Модель не включает скважину: случай со скважиной считается слишком

сложным для аналитических вычислений. Здесь же приведены результаты расчетов сигналов потенциал-зонда при нормальном и наклонном профилировании границы между полупространствами:

1) в случае характерной для осадочных отложений анизотропии: ось анизотропии ориентирована нормально границе полупространств (вертикальное удельное электрическое сопротивление ρ_v), электропроводность в параллельных границе направлениях одинакова (горизонтальное удельное электрическое сопротивление ρ_h);

2) в случае, соответствующем кривой слоистости в одном из полупространств (ось анизотропии наклонена в верхнем полупространстве, зонд пересекает границу под разными углами);

3) в случае совпадающего наклона зонда и оси анизотропии в обоих полупространствах относительно границы.

Используемые при расчетах значения параметров геоэлектрических моделей: для $\rho_h = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, для $\rho_v = 4$ и $8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, таким образом, коэффициент анизотропии $\lambda \left(\lambda = \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_h}} \right)$ составляет 1.4 и 2. Те же авторы ссылаются на данные лабораторных измерений коэффициента анизотропии: «Laboratory measurements (Keller, Frischknecht, 1966; Hill, 1972;) have found λ in the range 1–2.5» [Moran, Gianzero, 1982]. В работе [Moran, Gianzero, 1979] рассматриваются различные значения зенитного и азимутального углов наклона (поворота) зонда и оси электрической анизотропии относительно нормали к плоской границе между полупространствами: $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 180^\circ$.

Публикация [Anderson et al., 1995] посвящена развитию программно-методического обеспечения в области решения прямой задачи индукционного каротажа на кабеле (приборы DIT и AIT), а также высокочастотного электромагнитного каротажа в процессе бурения (аппаратура CDR). Рассмотрена геоэлектрическая модель трансверсально-изотропных пластов с параметризацией горизонтальным и вертикальным УЭС, отношение вертикального УЭС к горизонтальному от 5 до 200, что соответствует коэффициенту анизотропии λ примерно от 2 до 14. Пересечение границ пластов индукционными зондами аппаратуры AIT и CDR наклонное вплоть до почти горизонтального (зенитный угол 85° и 86°). В приведенной работе можно выделить следующие конкретные модели, используемые при расчете сигналов:

- 1) слоистая с изотропными вмещающими глинистыми породами ($\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и трансверсально-изотропными пластами, характеризующимися значениями параметров: $\rho_h = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, мощность $h = 9 \text{ м}$; $\rho_h = 0.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 0.6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, мощность $h = 12 \text{ м}$; $\rho_h = 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 2.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, мощность $h = 17 \text{ м}$ (как отмечают авторы, пласт с нетипичным соотношением удельных сопротивлений); каротажный прибор пересекает слои под зенитными углами 0° и 60° ;
- 2) однородная трансверсально-изотропная со значениями ρ_h : $0.33 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $3.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $33.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, соотношениями $\frac{\rho_v}{\rho_h}$: 5, 10, 20, 50, 100, 200; зенитный угол прибора изменяется от 0° до 90° с шагом 10° ;
- 3) верхнее изотропное и нижнее трансверсально-изотропное полупространства, ρ в верхнем пласте (и ρ_h в нижнем пласте) составляет $3.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $33.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; в анизотропном слое соотношение $\frac{\rho_v}{\rho_h}$ равно 10 и 100; наклон прибора – $0^\circ, 45^\circ, 85^\circ$.

При этом авторы не указывают напрямую, учитывается ли при моделировании скважина с раствором, ссылаясь на хороший алгоритм коррекции влияния скважины при обработке измеряемых сигналов. При моделировании сигналов катушки зондов приборов аппроксимируются точечными

магнитными диполями. Также не указан способ расчета, хотя по предыдущим статьям можно предположить численно-аналитический и конечно-элементный алгоритмы [Anderson, Chang, 1982; Chang, Anderson, 1984].

В связи с распространением субгоризонтального бурения и соответствующим усложнением интерпретации данных скважинной электрометрии разработаны алгоритмы трехмерного численного моделирования сигналов индукционного (прибор АИТ) [Anderson et al., 1996] и высокочастотного электромагнитного (приборы CDR и ARC5) [Anderson et al., 1997] каротажа, основанные на методе конечных разностей, использующие метод спектрального разложения Ланцоша для решения уравнений Максвелла. Подразумевается возможность совокупного использования алгоритмов для данных высокочастотного электромагнитного каротажа в процессе бурения и индукционного каротажа на кабеле с целью их совместной интерпретации и согласования.

Созданные конечно-разностные алгоритмы позволяют учитывать влияние наклона приборов относительно трансверсально-изотропных пластов, а также, в отличие от предшествовавших алгоритмов, влияние скважины, проникновения фильтрата бурового раствора и других эффектов (эксцентриситета прибора, наличия трещин, разломов, неравномерного проникновения) на сигналы зондов. Кроме того, для удобства пользователя создан графический интерфейс, позволяющий задавать слоистую геоэлектрическую модель среды, вскрытой скважиной с углом наклона от 0° до 90° , в трехмерном пространстве для дальнейшего численного моделирования.

Конечно-разностные алгоритмы для методов индукционного (прибор АИТ с рабочими частотами 26, 52 и 105 кГц) и высокочастотного (аппаратура CDR и ARC5 с рабочей частотой 2 МГц) электромагнитного каротажа верифицированы с применением аналитического алгоритма моделирования (указанного в [Anderson et al., 1995]), в том числе для модели с трансверсально-изотропным пластом и наклоном прибора относительно границы.

Сигналы индукционного каротажа рассчитаны в следующих моделях [Anderson et al., 1996]:

- 1) двухслойная, верхний пласт которой трансверсально-изотропный ($\rho_h = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), а нижний изотропный ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), при этом зенитный угол наклона прибора по отношению к пересекаемой границе равен 45° , влияние зоны проникновения не учитывается;
- 2) двухслойная с изотропным верхним пластом ($\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и трансверсально-изотропным нижним ($\rho_h = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), зонды прибора расположены в нижнем слое параллельно границе на различных расстояниях от нее, берется в расчет изотропная зона проникновения радиусом примерно 2.3 м ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

В работе [Anderson et al., 1996] не учитывалось непосредственное влияние скважины на данные прибора АИТ. Авторы объясняют это намерениями рассмотреть лишь эффекты геологической среды на сигналы зондов, а также моделировать данные, симулирующие практические сигналы аппаратуры АИТ, при обработке которых применена коррекция влияния скважины. Кроме того, учет влияния скважины осложнил бы проведение верификации ввиду того, что аналитический алгоритм не позволяет учесть этот эффект.

При расчетах сигналов высокочастотного электромагнитного каротажа [Anderson et al., 1997] использована модель мощного трансверсально-изотропного пласта ($\rho_h = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 26 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), пересекаемого прибором под зенитным углом 80° , с учетом влияния трансверсально-изотропной зоны проникновения (приблизительные значения: $\rho_h = 2.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 3.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) с изменяющимся радиусом от 0 до 1.3 м.

Применительно к развитию методико-алгоритмического обеспечения в области интерпретации данных индукционного каротажа посредством решения прямой задачи известна работа [Hagiwara, 1995]. В ней произведены расчеты в рамках моделей:

- 1) изотропного слоя с УЭС 5, 10 и 20 Ом·м конечной мощности (около 1.5, 3, 6, 12 м), трансверсально-изотропных вмещающих пластов ($\rho_h = 1$ Ом·м, $\rho_v = 4$ Ом·м), вскрытых наклонной скважиной с зенитным углом 60° ;
- 2) трансверсально-изотропного слоя ($\rho_h = 1.9$ Ом·м, $\rho_v = 10.6$ Ом·м) с теми же мощностями, изотропных ($\rho = 1$ Ом·м), а также трансверсально-изотропных ($\rho_h = 1$ Ом·м, $\rho_v = 4$ Ом·м) вмещающих пластов, вскрытых наклонной скважиной с зенитным углом 60° .

Выполнен анализ влияния мощности, УЭС промежуточного слоя для моделей из пункта 1, а также влияния мощности промежуточного слоя для моделей из пункта 2 на кажущееся УЭС прибора 6FF40. Метод моделирования явно не указан, эффекты скважины не учтены для упрощения расчетов.

Результаты исследования зависимости коэффициента электрической анизотропии λ от литологических и петрофизических параметров тонких чередующихся пропластков в терригенном коллекторе приведены в [Klein et al., 1995]. Описаны лабораторные измерения по образцам песчаников, слагающих тонкослоистый коллектор месторождения Купарук (Аляска). В результате эксперимента рассчитаны значения соотношения вертикального и горизонтального УЭС $\left(\frac{\rho_v}{\rho_h}\right)$ примерно от 1 до 4 для коллектора месторождения в зависимости от его насыщения: с увеличением нефтенасыщенности соотношение УЭС возрастает. Кроме того, приведены данные электромагнитного каротажа из субгоризонтальной скважины, вскрывающей указанные отложения. В результате обработки сигналов разности фаз и отношения амплитуд рассчитаны значения УЭС песчаного коллектора: ρ_h от 2 до 20 Ом·м, ρ_v – от 10 до 1000 Ом·м, при этом соотношения УЭС песчаного коллектора принимают значения до 100, что соответствует коэффициенту анизотропии λ до 10. Авторами предложены уравнения, связывающие при определенных петрофизических условиях тангенциальную (перпендикулярную оси анизотропии) и нормальную (параллельную оси анизотропии) проницаемость анизотропных слоистых коллекторов с их нормальным и тангенциальным удельным сопротивлением соответственно. Аналитическими расчетами показано, что оценка тангенциальной проницаемости с использованием нормального удельного сопротивления дает более точные результаты, чем с применением тангенциального УЭС. Отмечается, что такая зависимость может быть полезна при условии, что есть возможность оценки нормального УЭС коллектора, например, при помощи данных электромагнитного каротажа из субгоризонтальной скважины, вскрывающей коллектор, описываемый трансверсально-изотропной моделью, когда ось каротажного прибора характеризуется относительным наклоном к оси электрической анизотропии пород.

В рамках развития теоретико-методической базы применительно к оценке параметров электрической анизотропии с относительным наклоном оси предложен способ определения горизонтального УЭС с использованием данных метода электромагнитного каротажа для однородной модели трансверсально-изотропного пласта (со значениями ρ_h от 0.5 до 10 Ом·м, величины коэффициента анизотропии λ не указаны в явном виде), пересеченного скважиной с высоким относительным углом наклона (например, для горизонтального пласта, вскрытого наклонно-горизонтальной скважиной) [Hagiwara, 1996]. Утверждается, что определение горизонтального УЭС геоэлектрической модели возможно с использованием математических соотношений и хотя бы двух значений сигналов электромагнитного каротажа. В качестве данных используются сигналы индукционного каротажа на кабеле либо разности фаз и отношения амплитуд высокочастотного электромагнитного каротажа в

процессе бурения, в том числе полученные для зондов различной длины или частоты. Преимущество метода состоит в том, что он не требует знания угла наклона скважины относительно нормали к границе пласта (угла θ) при расчете горизонтального УЭС. Более того, автор утверждает, что с использованием предложенного метода, после определения горизонтального УЭС, возможна оценка коэффициента электрической анизотропии, если известен угол θ , и, наоборот, возможна оценка угла θ , если известен коэффициент анизотропии.

Работа [Graciet, Shen, 1997] посвящена разработке программно-методического обеспечения: создан алгоритм расчета сигналов метода индукционного каротажа для частот, составляющих десятки кГц (прибор 6FF40) и 2 МГц (аппаратура CDR), в трансверсально-изотропных геоэлектрических моделях, но без учета влияния скважины и зоны проникновения. Отмечается, что для прибора высокочастотного электромагнитного каротажа в процессе бурения наличие анизотропии может быть установлено по расхождению значений кажущихся УЭС, определенных по разностям фаз и отношениям амплитуд [Каринский, 2018]. При моделировании данных использованы:

- 1) трехслойная модель; промежуточный трансверсально-изотропный пласт со значениями параметров: $\rho_h = 1.8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 5.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.7$), мощность пласта h изменяется от 1 м до 6 м, УЭС вмещающих изотропных пород $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, зенитные углы наклона прибора θ – от 0° до 89° ;
- 2) та же модель с другими значениями параметров: $\rho_h = 2.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 16.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 2.7$), $h = 3 \text{ м}$, $\rho = 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, θ – от 0° до 75° ;
- 3) трехслойная модель с трансверсально-изотропным промежуточным слоем: $\rho_h = 1.8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 5.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.7$), $h = 1 \text{ м}$ и трансверсально-изотропными вмещающими пластами: $\rho_h = 2.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 16.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 2.7$), $\theta = 0^\circ\text{--}75^\circ$.

Возможности зондов ВИКИЗ при определении геоэлектрических параметров макроанизотропной среды в субгоризонтальных скважинах исследованы в [Эпов и др., 1998]. Рассмотрена трехслойная геоэлектрическая модель с трансверсально-изотропным тонкослоистым коллектором мощностью 1 м и изотропными вмещающими породами, зенитным углом наклона каротажного прибора от 80° до 89° и следующими геоэлектрическими параметрами:

- 1) для коллектора: $\rho_h = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\lambda = 1.05\text{--}1.2$, для вмещающих слоев: $\rho = 8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- 2) коллектор: $\rho_h = 8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\lambda = 1.05\text{--}1.2$, вмещающие слои: $\rho = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Влияние скважины и зоны проникновения считается достаточно малым и не учитывается. Описана методика оценки эффективной мощности и УЭС терригенных тонкослоистых коллекторов с использованием спектрального анализа сигналов коротких зондов и автоматической инверсии данных длинных зондов ВИКИЗ. Зависимость сигналов низкочастотного и высокочастотного индукционного каротажа от вертикального УЭС слоистой пачки, возникающая в наклонных скважинах, рассматривается в [Эпов и др., 1999].

Решение прямой задачи электромагнитных зондирований в слоисто-однородной наклонно-анизотропной среде (с ненулевым углом наклона главных осей тензора удельной электропроводности) без учета влияния скважины и проникновения рассматривается в работе [Федоров, Эпов, 2003]. Получены аналитические представления для электромагнитных полей в моделях:

- 1) два наклонно-анизотропных полупространства ($\rho_h = 0.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, λ примерно равен 1.6 для обоих слоев), описываемые тензорами удельной электропроводности с малыми, неравными между собой углами наклона главных осей: $\theta_1 = 4^\circ$ (в верхнем полупространстве), $\theta_2 = 2^\circ$ (в нижнем полупространстве);

- 2) два трансверсально-изотропных (с нулевыми углами θ_1 и θ_3) полупространства с равными тензорами УЭП, между ними расположен пласт, в котором тензор удельной электропроводности в главных осях совпадает с таковым для вмещающей среды, а угол наклона главных осей (θ_2) считается малым; значения УЭС явно не указаны.

Кроме того, в работе [Федоров, Эпов, 2003] выполнено построение распределения вторичных источников электромагнитного поля в среде.

В публикации [Федоров, Эпов, 2005] предлагается способ определения элементов кажущегося тензора УЭП среды с помощью их выражения через значения сигналов трехкатушечного зонда с различной взаимной ориентацией моментов источника и приемных катушек. При расчетах применяется трехслойная модель с изотропными вмещающими полупространствами ($\rho_1 = 3.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_3 = 4.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ для верхнего и нижнего полупространств соответственно) и наклонно-анизотропным промежуточным слоем с $\rho_h = 6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.3$), мощностью 2 м и углом θ (между осью прибора и осью анизотропии) 27° .

Проведено математическое моделирование и анализ сигналов электромагнитного и электрического каротажа, а также функций их чувствительности для макроанизотропной среды, без учета влияния скважины и проникновения [Эпов и др., 2016]. Рассмотрены модели:

- 1) однородная трансверсально-изотропная, $\rho_h = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 9; 16 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.5; 2$), с различными значениями зенитного угла между каротажным прибором и вертикалью – от 0° до 90° (глинистая покрывка в терригенном разрезе);
- 2) двухслойная горизонтально-слоистая, оба пласта трансверсально-изотропные, в верхнем полупространстве $\rho_{h1} = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{v1} = 9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.5$), в нижнем – $\rho_{h2} = 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{v2} = 60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 2$), зенитный угол наклона прибора 60° (глинистая покрывка и нефтенасыщенный песчаник);
- 3) трехслойная горизонтально-слоистая, два верхних пласта – трансверсально-изотропные (глинистая покрывка и нефтенасыщенный песчаник), $\rho_{h1} = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{v1} = 6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 1.4$), $\rho_{h2} = 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{v2} = 75 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\lambda = 2.2$), нижний – изотропный (водонасыщенный песчаник), $\rho_3 = 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, каротажный прибор перемещается в пределах модели по криволинейной траектории.

Результатами расчетов показано, что совместное использование данных в силу независимости поведения сигналов вблизи геоэлектрических границ позволяет определять параметры рассматриваемых макроанизотропных моделей и значительно повысить достоверность результатов интерпретации.

В начале 2000-х годов осуществлено расширение аппаратно-методической базы применительно к методу многокомпонентного индукционного каротажа, сигналы которого чувствительны к электрической анизотропии при любом наклоне скважины в среде [Kriegshaüser et al., 2000; Rabinovich et al., 2004]. Компанией Baker Atlas разработан прибор многокомпонентного индукционного каротажа 3DEX, предназначенный для определения параметров электрической анизотропии коллекторов [Page et al., 2001]. Прибор включает в себя три генераторные и три приемные катушки, ориентированные в трех взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 1), обеспечивая 9 различных измеряемых характеристик [Zhang et al., 2007].



Рис. 1. Схема конфигурации прибора 3DEX: Т – генераторная катушка (красным цветом), R – приемная катушка (синим цветом); x, y, z – пространственные ориентации катушек

Генераторные катушки прибора наводят токи во всех трех пространственных направлениях, а приемные катушки регистрируют характеристики соответствующих магнитных полей. Токи, наведенные горизонтально расположенными генераторными катушками, текут и перпендикулярно, и параллельно напластованию. Следовательно, зонды, включающие в себя такие катушки, чувствительны как к горизонтальному, так и к вертикальному УЭС. Таким образом, с использованием этих зондов возможно восстановление горизонтального и вертикального УЭС горных пород при проведении каротажа в вертикальных, наклонных и горизонтальных скважинах. Помимо этого, по данным аппаратуры может быть определен угол наклона прибора по отношению к анизотропному пласту. Однако определение геометрических и геоэлектрических параметров пласта по сигналам этого прибора требует применения трехмерного моделирования и инверсии [Davydycheva, Frenkel, 2010].

Известно, что для упрощения численных расчетов сигналов традиционного индукционного каротажа источники и приемники представляются в виде точечных магнитных диполей. Такой подход эффективен для расчета сигналов в приемных катушках с магнитными моментами, соосными скважине. В работе [Kriegshauser et al., 2000] показано, что приемные катушки с магнитными моментами, перпендикулярными осям прибора и скважины, тоже могут быть представлены в виде точечных магнитных диполей ввиду малой вносимой погрешности в сигнал – до 0.5 %.

Выбор параметров рассматриваемого прибора основан на исследованиях его разрешающей способности. При соответствующих расчетах применялись цилиндрически-слоистые, горизонтально-слоистые и двумерные слоистые модели, учитывающие влияние скважины, зоны проникновения. Более того, для оценки оптимальности выбранных параметров выполнен анализ чувствительности данных к параметрам отложений, а также к таким источникам помех, как неровности стенок скважины, эксцентриситет, изгиб прибора. Для реалистичной оценки разрешающей способности аппаратуры создана комплексная модель шумов, которая учитывает наиболее значительные виды влияния на данные. Такой подход позволил провести количественное сравнение различных вариантов конструкции прибора и выбрать оптимальный из них. По результатам расчетов сделан вывод, что с использованием сигналов прибора возможно определение параметров анизотропных пластов мощностью порядка 2–3 м. Аппаратура применена в полевых условиях, а полученные и проинтерпретированные данные подтвердили ее прогнозируемые возможности.

Также в начале 2000-х годов компанией Schlumberger разработан прибор многокомпонентного индукционного каротажа Rt Scanner [Rosthal et al., 2003, Hu et al., 2017], сигналы которого чувствительны к тангенциальному и нормальному УЭС электрически анизотропной среды при любом относительном угле наклона прибора [Wang et al., 2006]. Кроме того, утверждается, что Rt Scanner позволяет оценить угол и азимут падения электрически анизотропного пласта [Zhang et al., 2007].

На рисунке 2 схематически изображена конфигурация прибора Rt Scanner. Он включает в себя один комплект генераторных и шесть комплектов приемных катушек с совмещенными центрами. Каждый такой комплект представляет собой три взаимно-ортогональные катушки, расположенные в одной общей точке. Набор зондов прибора, состоящих из этих комплектов, позволяет проводить трехкомпонентные измерения с различными глубинностями (для разных комплектов приемных катушек). Более того, в конфигурацию прибора входят три соосные прибору приемные катушки, составляющие вместе с комплектом генераторных катушек три коротких зонда.

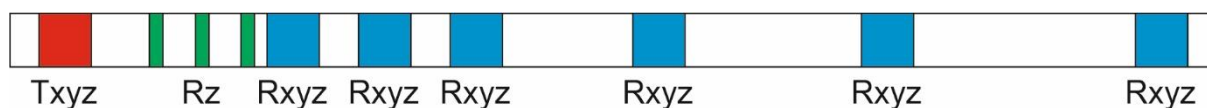


Рис. 2. Схема конфигурации прибора Rt Scanner; Txyz – комплект генераторных катушек с совмещенными центрами (красным цветом), Rxyz – комплекты приемных катушек с совмещенными центрами (синим цветом), Rz – три соосные прибору приемные катушки

Предложен способ оценки угла наклона скважины относительно пласта, а также коэффициента анизотропии с помощью соотношения между компонентами сигнала прибора Rt Scanner без проведения инверсии [Hagiwara, 2010]. Для учета влияния мощности и коэффициента анизотропии пласта на оцениваемые кажущиеся параметры геоэлектрической модели выполнено моделирование синтетических сигналов Rt Scanner (с дальнейшим применением для них предлагаемого метода) в трехслойной модели с изотропными вмещающими породами с УЭС 10 Ом·м, промежуточным трансверсально-изотропным пластом со значениями $\rho_h = 10$ Ом·м, $\rho_v = 10.2; 10.8; 12.7; 91.5$ Ом·м ($\lambda = 1.01; 1.04; 1.125; 3.025$), мощностью 13 м, 25 м, 50 м, 100 м. Зенитный угол наклона прибора составляет 30° . При этом явно не указывается, учитывается ли влияние скважины. В работе [Щетинина и др., 2020] при интерпретации данных ГИС применяются результаты исследования керна и инверсии трехкомпонентных измерений прибора Rt Scanner из наклонно-направленных и субгоризонтальных участков скважины. Авторами приведен пример зависимости вертикального УЭС ρ_v от горизонтального УЭС ρ_h , определяемой с использованием указанного комплекса методов и выраженной в виде степенных функций, для песчаных и глинистых пород анизотропной толщи.

В статье [Nechaev et al., 2021] проведен анализ возможностей оценки горизонтального и вертикального удельных сопротивлений, а также угла наклона θ главных осей тензора УЭС (относительно оси вертикальной скважины) анизотропной среды по комплексу данных отечественных методов скважинной электрометрии (ВИКИЗ и БКЗ). Вид тензора УЭС подобен представленному в (1) для тензора УЭП. Моделирование синтетических сигналов выполнено с использованием метода конечных элементов в следующих моделях:

- 1) УЭС скважины $\rho_c = 1$ Ом·м, радиус скважины $r_c = 0.108$ м, однородный наклонно-анизотропный пласт: $\rho_h = 4; 15$ Ом·м, $\rho_v = 9; 75$ Ом·м ($\lambda = 1.5; 2.2$ соответственно), $\theta = 0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 90^\circ$ (песчано-глинистые породы Западной Сибири);
- 2) $\rho_c = 1$ Ом·м, $r_c = 0.108$ м, однородный наклонно-анизотропный пласт: $\rho_h = 50$ Ом·м, $\rho_v = 50\text{--}800$ Ом·м ($\lambda = 1\text{--}4$), $\theta = 0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 90^\circ$ (отложения баженовской свиты);
- 3) горизонтально-слоистая; $\rho_c = 1$ Ом·м, $r_c = 0.108$ м; перекрывающий и подстилающий слои – аргиллиты с $\rho_h = 10$ Ом·м, $\lambda = 1.2$, $\theta = 1^\circ$; карбонатные породы мощностью $h = 4$ м, $\rho_h = 200$ Ом·м, $\lambda = 3.5$, $\theta = 85^\circ$; карбонатно-кремнистые микститы: $h = 4$ м, $\rho_h = 150$ Ом·м, $\lambda = 3$, $\theta = 45^\circ$; слой силицитов: $h = 6$ м, $\rho_h = 100$ Ом·м, $\lambda = 1.5$, $\theta = 2.5^\circ$; аргиллитно-кремнисто-карбонатные микститы: $h = 12$ м, $\rho_h = 50$ Ом·м, $\lambda = 2$, $\theta = 5^\circ$ (обобщенная двумерная модель баженовской свиты).

Результатами расчетов показано, что по сигналам этих методов с использованием созданного программного обеспечения и с учетом наклона оси электрической анизотропии возможно более точное изучение трещиновато-тонкослоистых интервалов баженовской свиты, являющихся чрезвычайно перспективными на залежи нефти.

ВЫВОДЫ

Изучение геологической среды, характеризующейся наклоном оси электрической анизотропии относительно оси каротажного прибора, началось более 40 лет назад. На ранних этапах оно проводилось с помощью аналитических вычислений, затем – с использованием специально разрабатываемого программно-алгоритмического обеспечения для численного моделирования сигналов скважинной электрометрии. Кроме того, проектировалась и создавалась измерительная аппаратура многокомпонентного индукционного каротажа, предназначенная для оценки параметров геоэлектрических моделей с произвольным относительным углом между осью анизотропии и осью каротажного прибора.

В работах отечественных и зарубежных ученых с использованием аналитических выражений предложен способ определения компонент электромагнитного поля произвольного гармонического источника, а также выполнен теоретический анализ потенциала источника постоянного электрического тока в слоистых наклонно-анизотропных моделях среды. Кроме того, показана связь фильтрационно-емкостных параметров слоистых коллекторов с их удельными сопротивлениями в различных направлениях, а также предложены зависимости, позволяющие с определенными ограничениями оценить значения УЭС и относительного угла наклона оси электрической анизотропии по сигналам электромагнитного каротажа.

В связи с необходимостью повышения точности решения прямых задач отмечается постепенное усложнение со временем трансверсально-изотропных моделей, используемых для расчетов сигналов. Появление и дальнейшее совершенствование численных алгоритмов решения прямых задач позволило учитывать при моделировании (примерно с конца 1990-х годов) различные эффекты: влияние скважины, неравномерного проникновения фильтрата бурового раствора, эксцентриситета прибора, трещин и разломов на данные зондов.

Разработка зарубежными компаниями приборов многокомпонентного индукционного каротажа, чувствительных к горизонтальному и вертикальному УЭС среды при различных зенитных углах скважины, позволила повысить эффективность определения параметров геоэлектрических моделей с относительным наклоном оси электрической анизотропии. Однако при этом требуется применение ресурсоемких алгоритмов трехмерного моделирования и инверсии.

Среди рассмотренных трансверсально-изотропных моделей, используемых для решения прямой и обратной задач, выделяются как параметризуемые горизонтальным и вертикальным УЭС с ненулевым зенитным углом наклона прибора, так и описываемые тензором УЭП (либо УЭС) с наклоном главных осей. Кроме того, применяются как однородные, так и слоистые модели, с учетом и без учета влияния скважины. Значения геоэлектрических параметров моделей изменяются в широких пределах: горизонтального УЭС – от 0.33 до 200 Ом·м, вертикального УЭС – от 0.6 до 1000 Ом·м, коэффициента анизотропии – от 1 до 14, зенитного угла наклона каротажного прибора (или угла наклона главных осей тензора УЭП) – от 0° до 90°.

Одним из дальнейших возможных направлений развития исследований является изучение возможности переинтерпретации архивных данных комплекса стандартных отечественных методов скважинной электрометрии в рамках моделей с наклоном оси электрической анизотропии относительно оси каротажного прибора.

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

ЛИТЕРАТУРА

- Каринский А.Д.** Электромагнитное поле в моделях электрически анизотропной среды. – М.: ГЕОС, 2018. – 184 с.
- Сухорукова К.В., Петров А.М.** Электрическая анизотропия терригенных отложений: краткий обзор подходов к ее определению по данным электрокаротажа в вертикальных скважинах // Геофизические технологии. – 2021. – № 3. – С. 41–66, doi: 10.18303/10.18303/2619-1563-2021-3-41.
- Табаровский Л.А., Эпов М.И.** Электромагнитные поля гармонических источников в слоистых анизотропных средах // Геология и геофизика. – 1977. – № 18 (1). – С. 101–109.
- Федоров А.И., Эпов М.И.** Переменное электромагнитное поле в наклонно-анизотропной слоистой среде // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2003. – № 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. – № 8 (1). – С. 143–152.
- Щетинина Н.В., Гильманов Я.И., Паромов С.В., Мамяшев В.Г.** Изучение анизотропии геолого-геофизических параметров горных пород с целью совершенствования методики интерпретации данных геофизических исследований горизонтальных участков скважин (Восточная Сибирь) // Каротажник. – 2020. – № 1 (301). – С. 84–93.
- Эпов М.И., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н.** Оценка параметров тонкослоистых коллекторов по данным высокочастотных электромагнитных зондирований в горизонтальных скважинах // Геология и геофизика. – 1998. – № 39 (11). – С. 1608–1614.
- Эпов М.И., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н.** Оценка электрической анизотропии по диаграммам ВИКИЗ // Каротажник. – 1999. – № 54. – С. 17–29.
- 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 (260). – С. 64–79.
- Anderson B., Chang S.** Synthetic induction logs by the finite element method // The Log Analyst. – 1982. – Vol. 23 (6). – P. 17–26.
- Anderson B., Barber T., Lüling M.** The response of induction tools to dipping, anisotropic formations // SPWLA 36th Annual Logging Symposium. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-D. – 12 p.
- Anderson B., Barber T., Druskin V., Lee P., Dussan, V.E., Knizhnerman L., Davydycheva S.** The response of multiarray induction tools in highly dipping formations with invasion and in arbitrary 3D geometries // SPWLA 37th Annual Logging Symposium. – New Orleans, Louisiana, 1996. – Paper SPWLA-1996-A. – 14 p.
- 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 Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 1997. – Paper SPWLA-1997-N. – 14 p.
- Chang S., Anderson B.** Simulation of induction logging by the finite element method // Geophysics. – 1984. – Vol. 49 (11). – P. 1943–1958, doi: 10.1190/1.1441606.
- Davydycheva S., Frenkel M.A.** Review of 3D EM modeling and interpretation methods for triaxial induction and propagation resistivity well logging tools // PIERS Proceedings. – Cambridge, 2010. – P. 390–396.
- Graciet S., Shen L.C.** Simulation of induction and MWD resistivity tools in anisotropic dipping beds // SPWLA 38th Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 1997. – Paper SPWLA-1997- M. – 14 p.

- Hagiwara T.** Anisotropic shale and induction log shoulder bed corrections for deviated boreholes // SPWLA 36th Annual Logging Symposium. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-Z. – 12 p.
- Hagiwara T.** A new method to determine horizontal-resistivity in anisotropic formations without prior knowledge of relative dip // SPWLA 37th Annual Logging Symposium. – New Orleans, Louisiana, 1996. – Paper SPWLA-1996-Q. – 8 p.
- Hagiwara T.** Determination of dip and anisotropy from multi-frequency tri-axial induction measurements // PIERS Online. – 2010. – Vol. 6 (5). – P. 445–449, doi: 10.2529/PIERS091217080307.
- Hill D.G.** A laboratory investigation of electrical anisotropy in Precambrian rocks // Geophysics. – 1972. – Vol. 37 (6). – P. 1022–1038, doi: 10.1190/1.1440311.
- Hu Y., Wang G., Liang L., Abubakar A.** Estimation of reservoir parameters from inversion of triaxial induction data constrained by mud-filtrate invasion modeling // IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques. – 2017. – Vol. 2. – P. 228–236, doi: 10.1109/JMMCT.2017.2787652.
- Keller G.V., Frischknecht F.C.** Electrical methods in geophysical prospecting. – Pergamon Press, Oxford, 1966. – 517 p.
- Klein J.D., Martin P.R., Allen D.F.** The petrophysics of electrically anisotropic reservoirs // SPWLA 36th Annual Logging Symposium. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-HH. – 12 p.
- Kriegshaüser B., Fanini O., Forgang S., Itskovich G., Rabinovich M., Tabarovsky L., Yu L., Epov M., Gupta P., v. d. Horst J.** A new multicomponent induction logging tool to resolve anisotropic formations // SPWLA 41st Annual Logging Symposium. – Dallas, Texas, 2000. – Paper SPWLA-2000-D. – 14 p.
- Moran J.H., Gianzero S.** Effects of formation anisotropy on resistivity-logging measurements // Geophysics. – 1979. – Vol. 44 (7). – P. 1266–1286, doi: 10.1190/1.1441006.
- Moran J.H., Gianzero S.** Electrical anisotropy: its effect on well logs // Developments in Geophysical Exploration Methods—3. – Springer, Dordrecht, 1982. – P. 195–238, doi: 10.1007/978-94-009-7349-7_6.
- 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. – Vol. 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 Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, Louisiana, 2001. – Paper SPE-71724-MS. – 14 p., doi: 10.2118/71724-MS.
- Rabinovich M., Besspalov A., Corley B., Merchant G., Wang T., Quint E., Morrison J.** Effect of fractures on multi-component and multiarray induction logs // SPWLA 45th Annual Logging Symposium. – Noordwijk, 2004. – Paper SPWLA-2004-UU. – 16 p.
- 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 Annual Logging Symposium. – Galveston, Texas, 2003. – Paper SPWLA-2003-QQ. – 14 p.
- 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 Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, 2006. – Paper SPE-103113-MS, doi: 10.2118/103113-MS.

Zhang Z., Akinsamni O., Ha K.-T., Bourgeois T., Jock S., Blumhagen C., Stromberg S. Triaxial induction logging – an operator's perspective // SPWLA 48th Annual Logging Symposium. – Austin, Texas, 2007. – Paper SPWLA-2003-Y. – 16 p.

REFERENCES

Anderson B., Chang S. Synthetic induction logs by the finite element method // *The Log Analyst*. – 1982. – Vol. 23 (6). – P. 17–26.

Anderson B., Barber T., Lüling M. The response of induction tools to dipping, anisotropic formations // SPWLA 36th Annual Logging Symposium. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-D. – 12 p.

Anderson B., Barber T., Druskin V., Lee P., Dussan, V.E., Knizhnerman L., Davydycheva S. The response of multiarray induction tools in highly dipping formations with invasion and in arbitrary 3D geometries // SPWLA 37th Annual Logging Symposium. – New Orleans, Louisiana, 1996. – Paper SPWLA-1996-A. – 14 p.

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 Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 1997. – Paper SPWLA-1997-N. – 14 p.

Chang S., Anderson B. Simulation of induction logging by the finite element method // *Geophysics*. – 1984. – Vol. 49 (11). – P. 1943–1958, doi: 10.1190/1.1441606.

Davydycheva S., Frenkel M.A. Review of 3D EM modeling and interpretation methods for triaxial induction and propagation resistivity well logging tools // *PIERS Proceedings*. – Cambridge, 2010. – P. 390–396.

Epov M.I., Sukhorukova K.V., Nikitenko M.N. Estimation of parameters for thin-layered formations from high-frequency induction logging data in horizontal boreholes // *Russian Geology and Geophysics*. – 1998. – Vol. 39 (11). – P. 1608–1614.

Epov M.I., Sukhorukova K.V., Nikitenko M.N. Estimation of electrical anisotropy using VIKIZ diagrams // *Karotazhnik*. – 1999. – Vol. 54. – P. 17–29.

Epov M.I., Nikitenko M.N., Sukhorukova K.V., Glinskikh V.N. Studies on capabilities of electric and electromagnetic logs in electrically macroanisotropic formations exposed by inclined horizontal boreholes // *Karotazhnik*. – 2016. – Vol. 2 (260). – P. 64–79.

Fedorov A.I., Epov M.I. A variable electromagnetic field in an obliquely anisotropic layered medium // *Siberian Journal of Industrial Mathematics*. – 2003. – Vol. 6 (4). – P. 119–131.

Fedorov A.I., Epov M.I. Determination of the elements of the rocks electrical conductivity tensor based on electromagnetic logging data // *Siberian Journal of Industrial Mathematics*. – 2005. – Vol. 8 (1). – P. 143–152.

Graciet S., Shen L.C. Simulation of induction and MWD resistivity tools in anisotropic dipping beds // SPWLA 38th Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 1997. – Paper SPWLA-1997- M. – 14 p.

Hagiwara T. Anisotropic shale and induction log shoulder bed corrections for deviated boreholes // SPWLA 36th Annual Logging Symposium. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-Z. – 12 p.

Hagiwara T. A new method to determine horizontal-resistivity in anisotropic formations without prior knowledge of relative dip // SPWLA 37th Annual Logging Symposium. – New Orleans, Louisiana, 1996. – Paper SPWLA-1996-Q. – 8 p.

Hagiwara T. Determination of dip and anisotropy from multi-frequency tri-axial induction measurements // *PIERS Online*. – 2010. – Vol. 6 (5). – P. 445–449, doi: 10.2529/PIERS091217080307.

- Hill D.G.** A laboratory investigation of electrical anisotropy in Precambrian rocks // *Geophysics*. – 1972. – Vol. 37 (6). – P. 1022–1038, doi: 10.1190/1.1440311.
- Hu Y., Wang G., Liang L., Abubakar A.** Estimation of reservoir parameters from inversion of triaxial induction data constrained by mud-filtrate invasion modeling // *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*. – 2017. – Vol. 2. – P. 228–236, doi: 10.1109/JMMCT.2017.2787652.
- Karinsky A.D.** Electromagnetic field in models of an electrically anisotropic medium [in Russian]. – GEOS, Moscow, 2018. – 184 p.
- Keller G.V., Frischknecht F.C.** Electrical methods in geophysical prospecting. – Pergamon Press, Oxford, 1966. – 517 p.
- Klein J.D., Martin P.R., Allen D.F.** The petrophysics of electrically anisotropic reservoirs // *SPWLA 36th Annual Logging Symposium*. – Paris, 1995. – Paper SPWLA-1995-HH. – 12 p.
- Kriegshauser B., Fanini O., Forgang S., Itskovich G., Rabinovich M., Tabarovsky L., Yu L., Epov M., Gupta P., v. d. Horst J.** A new multicomponent induction logging tool to resolve anisotropic formations // *SPWLA 41st Annual Logging Symposium*. – Dallas, Texas, 2000. – Paper SPWLA-2000-D. – 14 p.
- Moran J.H., Gianzero S.** Effects of formation anisotropy on resistivity-logging measurements // *Geophysics*. – 1979. – Vol. 44 (7). – P. 1266–1286, doi: 10.1190/1.1441006.
- Moran J.H., Gianzero S.** Electrical anisotropy: its effect on well logs // *Developments in Geophysical Exploration Methods—3*. – Springer, Dordrecht, 1982. – P. 195–238, doi: 10.1007/978-94-009-7349-7_6.
- 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. – Vol. 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 Annual Technical Conference and Exhibition*. – New Orleans, Louisiana, 2001. – Paper SPE-71724-MS. – 14 p., doi: 10.2118/71724-MS.
- Rabinovich M., Besspalov A., Corley B., Merchant G., Wang T., Quint E., Morrison J.** Effect of fractures on multi-component and multiarray induction logs // *SPWLA 45th Annual Logging Symposium*. – Noordwijk, 2004. – Paper SPWLA-2004-UU. – 16 p.
- 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 Annual Logging Symposium*. – Galveston, Texas, 2003. – Paper SPWLA-2003-QQ. – 14 p.
- Shchetinina N.V., Gilmanov Ya. I., Paromov S.V., Mamyashev V.G.** A study of the anisotropy of the geologic and geophysical parameters of the rocks for the purpose of the improvement of the well log interpretation technique for horizontal borehole intervals (East Siberia) // *Karotazhnik*. – 2020. – No. 1 (301). – P. 84–93.
- Suhorukova K.V., Petrov A.M.** Electrical anisotropy of terrigenous deposits: a brief overview of approaches to its determination from electrical logging data in vertical wells // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. – 2021. – Vol. 3. – P. 41–66, doi: 10.18303/10.18303/2619-1563-2021-3-41.
- Tabarovsky, L.A., Epov, M.I.** Electromagnetic field of harmonic sources from the stratified anisotropic media // *Russian Geology and Geophysics*. – 1977. – Vol. 18 (1). – P. 101–109.

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 Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, 2006. – Paper SPE-103113-MS, doi: 10.2118/103113-MS.

Zhang Z., Akinsamni O., Ha K.-T., Bourgeois T., Jock S., Blumhagen C., Stromberg S. Triaxial induction logging – an operator's perspective // SPWLA 48th Annual Logging Symposium. – Austin, Texas, 2007. – Paper SPWLA-2003-Y. – 16 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МОСКАЕВ Илья Алексеевич – младший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований, обоснование новых методов исследования скважин, новые способы интерпретации, разработка программного обеспечения для моделирования и инверсии данных.

*Статья поступила в редакцию 19 декабря 2022 г.,
принята к публикации 24 декабря 2022 г.*