Геофизические технологии, № 3, 2021, с. 41–66 **www.rjgt.ru**
doi: 10.18303/2619–1563–2021–3–41 УДК 550.832

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ: КРАТКИЙ ОБЗОР ПОДХОДОВ К ЕЕ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

К.В. Сухорукова, А.М. Петров

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Кратко рассмотрены некоторые публикации по определению анизотропии электрического сопротивления горных пород, прежде всего осадочного генезиса, по сигналам методов скважинной электрометрии. По российским публикациям приведены сведения об основных причинах возникновения микро- и макроанизотропии песчано-глинистых отложений, по российским и зарубежным статьям – история развития модельного подхода к описанию анизотропии УЭС. Проведен анализ основных подходов к оценке вертикального сопротивления. Рассмотрены как новые аппаратурные приемы, направленные на непосредственное измерение чувствительных к анизотропии компонент электромагнитного поля, так и методические способы к извлечению этой информации из сигналов "классических" электрокаротажных зондов. Технические решения – это многокомпонентные измерения наклонными и перпендикулярными оси прибора катушками, а также соосными прибору тороидальными катушками. К методическим способам относится комплексирование данных, измеренных зондами с разным типом возбуждения среды, например, индуктивным и гальваническим. В ряде статей предлагается двухэтапная схема: первым шагом определять горизонтальное сопротивление по сигналам многозондового индукционного каротажа, вторым шагом – вертикальное сопротивление по сигналам фокусированных зондов бокового каротажа. Подобные схемы реализуются с применением алгоритмов численной инверсии, в некоторых случаях – построения трансформант. Введение в интерпретационную модель анизотропии базируется на априорных данных (исследование керна, данные микрокаротажа), а при отсутствии таковых – на основании принципиальной невозможности согласования параметров изотропных моделей, построенных независимо по сигналам зондов с разным типом возбуждения. Особый акцент в обзоре уделен развитию теории метода бокового каротажного зондирования (БКЗ) советскими и российскими учеными и истории исследования влияния электрической анизотропии на сигналы градиент-зондов. Ввиду повсеместного использования метода на территории СССР эта тематика представлена в ряде публикаций, раскрывающих результаты теоретических исследований анизотропных геоэлектрических моделей, численного и физического моделирования сигналов БКЗ и методических разработок для их интерпретации.

Удельное электрическое сопротивление; анизотропия; электрокаротажное зондирование; терригенные коллекторы; осадочные породы; геоэлектрическая модель

ELECTRICAL ANISOTROPY OF TERRIGENOUS DEPOSITS: A BRIEF OVERVIEW OF APPROACHES TO ITS DETERMINATION FROM ELECTRICAL LOGGING DATA IN VERTICAL WELLS

K.V. Sukhorukova, A.M. Petrov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

The article briefly reviews a number of publications on the problem of determining rocks electrical resistivity anisotropy (primarily of sedimentary genesis) using downhole resistivity logs. We provide the information on the main causes of sandy-

© К.В. Сухорукова, А.М. Петров, 2021

clay sediments micro- and macroanisotropy according to Russian papers and the history of the model-based approaches to the resistivity anisotropy description according to Russian and foreign articles. We analyze the main approaches to the vertical resistivity estimation. Both new hardware solutions aimed at direct measurement of electromagnetic field components sensitive to anisotropy and methodological techniques for extracting this information from the signals of "conventional" resistivity logging tools are considered according to published studies. The hardware solutions are multicomponent measurements with inclined and perpendicular (to the tool axis) coils, as well as with coaxial toroidal coils. Methodological techniques include combining data measured by tools with different types of medium excitation, for example, induction and galvanic. A number of papers suggest a two-step scheme: the first step is to determine the horizontal resistivity using induction arrays data, and the second step is to determine the vertical resistivity using focused lateral logs. Such schemes are implemented using numerical inversion algorithms and in some cases by inventing transformations of measured signals. Adding anisotropy to the interpretational model is based on a priori data (core studies, microresistivity logs). In the absence of a priori data, anisotropy is added when it is impossible to reconcile the parameters of isotropic models built independently based on logs with different type of excitation. A special focus of the review is on the development of the theory of unfocused lateral logging (BKZ) method by Soviet and Russian scientists and on the history of research on the electrical anisotropy influence on the signals of gradient probes. Due to the widespread use of the method in the USSR, this topic is presented in a number of papers revealing the results of anisotropic geoelectric models theoretical studies, numerical and physical modeling of BKZ logs and methodological developments for their interpretation.

Resistivity; anisotropy; logging; terrigenous reservoirs; clastic rocks; geoelectrical model

---

ВВЕДЕНИЕ

Усложнение строения осадочных отложений с глубиной выражается в уплотнении упаковки твердых изометричных частиц и все более субгоризонтальной ориентации уплощенных частиц. Эти процессы приводят к увеличению разницы физических свойств в направлениях вдоль и поперек слоистости, а при практически горизонтальном напластовании – в вертикальном направлении и горизонтальной плоскости. Установлена анизотропия на микро- и макроуровне как физических свойств: акустических, тепловых, электрических, так и фильтрационно-емкостных. Влияние микроанизотропии породы, обусловленной строением порового пространства и наличием электропроводящих частиц (части твердой матрицы или цемента), и макроанизотропии, характерной для квазипериодического переслаивания более песчаных и более глинистых осадков, тем сильнее отражается на сигналах скважинной электрометрии, чем глубже залегают исследуемые отложения.

Влияние анизотропии удельного электрического сопротивления (УЭС) – одна из причин кажущегося противоречия между данными зондов разной длины и/или разных методов электрокаротажа, традиционно представляемыми в виде значений кажущегося удельного электрического сопротивления ($\rho_к$). Подобные расхождения разновременных данных каротажа на кабеле, выполняемого в несколько приемов, традиционно трактуются как следствие изменения околоскважинного пространства за время, прошедшее между каротажами. Особенно часто это касается сигналов бокового каротажного зондирования и электромагнитного каротажного зондирования – БКЗ и ВЭМКЗ (или ВИКИЗ), поскольку между каротажами этими методами проходит несколько часов, а иногда и несколько суток. За это время может произойти как дополнительное проникновение бурового раствора в проницаемый пласт, так и размывание (разбухание) непроницаемых глинистых отложений. Но те же самые вопросы – чем объяснить расхождение $\rho_к$ – остаются и в материалах электрометрии, полученных при практически одновременном измерении комплексной аппаратурой СКЛ (НПП ГА "Луч", Новосибирск), в состав которой входят зонды

ВЭМКЗ и БКЗ. Калибровка и тестирование аппаратуры проводятся на всех этапах ее изготовления, поэтому гарантируется довольно высокая точность измерения, и ни одним из зондов нельзя пренебречь при интерпретации сигналов. В аппаратуре ВЭМКЗ зондирование осуществляется 9 зондами разной длины (от 0.5 до 2 м), работающими на пяти частотах, в аппаратуре БКЗ – шестью гальваническими зондами разной длины (от 0.45 до 8.5 м), что обеспечивает возможность согласования их данных за счет усложнения строения геоэлектрической модели и расширения набора электрофизических свойств, прежде всего введением анизотропии УЭС.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ОСАДОЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Для физических свойств осадочных отложений Западной Сибири характерна анизотропия, обусловленная процессом осадконакопления: физические свойства пластов практически одинаковы в плоскости напластования и отличны в вертикальном направлении. При погружении однородных осадков неизометричные частицы ориентируются под воздействием литостатического давления, в результате чего возникает микроанизотропия свойств (рассматриваемая, например, в работах [Викулова и др., 1973, Осипов и др., 2001; Гришкевич, 2005]. Вариация состава или размеров частиц приводит к разнице свойств смежных тонких прослоев, что создает макроанизотропию свойств осадочных отложений.

Электрическая анизотропия проявляется в том, что в горизонтальной плоскости значения УЭС (ρ_h) одинаковы, но отличны в вертикальном направлении (ρ_V), отношение ρ_V/ρ_h, как правило, больше единицы. Анизотропия УЭС осадочных отложений обеспечивается, с одной стороны, ориентацией слагающих породы неизометричных твердых частиц, с другой – попеременным осаждением то более глинистого, то более песчанистого материалов, то есть тонким переслаиванием. Если длина каротажного зонда больше толщины отдельных прослоев разного состава, то эти прослои часто не проявляются отдельно в измеренных сигналах, и такое строение среды называется электрически макроанизотропным. Оба типа анизотропии горной породы – и микро, и макро – при количественной интерпретации описываются анизотропной геоэлектрической моделью.

Данные об электрической анизотропии накапливались при изучении геологических объектов, представлявших интерес в тот или иной период. В 60-х годах прошлого столетия при исследовании песчаных коллекторов палеозоя Нижнего Поволжья были предложены геоэлектрические модели с переслаиванием песчаных и глинистых пород [Дахнов, 1962; Эйдман, 1966]. Некоторые модели трещиноватых коллекторов и угольных пластов рассмотрены в [Кашик, Макарова, 1970; Сидорчук, 1975].

Анизотропия особенно характерна для глинистых отложений, поскольку обусловлена одинаковой ориентацией пластинчатых частиц глинистых минералов и сложенных ими пакетов. Оценка коэффициента электрической анизотропии глин в публикациях встречается нечасто, поскольку глинистые отложения не являются главным объектом исследования при поиске нефтяных коллекторов и обычно тщательно не анализируются. Однако свойства глинистых отложений, являющихся покрышками нефтегазовых коллекторов, представляют интерес.

При исследовании глинистых покрышек в районах Западной Сибири установлено, что нефтегазонасыщение коллектора коррелирует с отсутствием в перекрывающем пласте песчаных прослоев [Прозорович, 1972]. То есть качество покрышки тем лучше, чем однороднее ее состав. В этом случае главной причиной анизотропии УЭС является микроанизотропия глинистых пород. С другой стороны, в покрышках над нефтесодержащими коллекторами система вертикальных микротрещин и

микропор частично заполняется углеводородами, что также снижает электропроводность в вертикальном направлении по сравнению с горизонтальным. Такая связь обуславливает интерес к изучению анизотропии УЭС покрышек.

В осадочном разрезе Западной Сибири покрышки в большинстве случаев представлены глинистыми отложениями разной степени однородности. Анизотропия УЭС глин достаточно подробно освещена в статье [Бедчер, 1962]. Исследования минерального состава покрышек (и их типизация на его основе), а также физических свойств, микроструктуры и микротрещиноватости проведены и в последние десятилетия [Александров, 1987; Осипов и др., 1989, 2001; Николаева, 1993; Соколов, 1996, 2000; Нестеренко, Глянцев, 2005; Давыдова, 2013]. Физические свойства покрышек, контрастные по сравнению с песчаными коллекторами, хорошо отражаются в сигналах нейтронного и гамма-каротажа, потенциале самополяризации и прочих, в том числе – электрического и электромагнитного каротажа.

Анизотропия песчано-глинистых пачек, включающих пористые и проницаемые нефтенасыщенные прослои, рассматривалась в российских и зарубежных работах (например, [Пирсон, 1961; Дахнов, 1962]). Для проницаемых прослоев, насыщенных нефтью или смесью нефти и пластовой воды, характерные значения УЭС занимают довольно широкий диапазон (от 5–6 до сотен и более Ом·м). УЭС глинистых прослоев в меловых отложениях обычно низкое, 3–5 Ом·м, что приводит к значительному снижению продольного УЭС слоистой пачки соответственно их доле. Уменьшение продольного УЭС при невозможности оценить долю глинистых прослоев может привести или к занижению оценки нефтесодержания, или к тому, что пачка вообще не рассматривается как возможный коллектор.

ЭЛЕКТРОКАРОТАЖ И СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ

Для оценки электрической анизотропии разрабатывались как новые методы и аппаратура, ориентированные на изучение этого свойства, так и новые способы количественной интерпретации сигналов, измеряемых аппаратурой традиционных и давно применяемых методов. Так, сигналы градиент-зондов содержат информацию о соотношении горизонтального и вертикального сопротивлений при измерении в вертикальной скважине. Но традиционное применение БКЗ сводится к интерпретации кривых зондирования в модели изотропного пласта с толщиной, превосходящей длину наибольшего зонда. В то же время для ограниченного набора моделей исследовано влияние анизотропии на сигналы коротких градиент-зондов в пластах большой мощности, а также градиент-зондов разной длины при пересечении горизонтальной границы.

В мировой практике при построении геоэлектрических моделей осадочных отложений, как правило, используются данные фокусирующих зондов постоянного тока и индукционных зондов. В последних чувствительность к вертикальному сопротивлению обеспечивается катушками, моменты которых направлены перпендикулярно [Zhang et al., 2003] или под углом к оси прибора [Li et al., 2005; Davydycheva, Frenkel, 2010; Bittar, 2011]. Для определения соотношения толщин проницаемых и непроницаемых прослоев по данным измерений в вертикальных скважинах используется комплекс трехкомпонентного индукционного каротажа и установок микрозондирований на постоянном токе (микроимиджер [FMI – азимутальный...; Gaillot et al., 2007]).

Применение электрического и электромагнитного каротажа для исследования в скважинах с целью выделения в разрезе пластов-коллекторов нефти и газа и оценки их продуктивности продолжается уже почти век. Приборы каротажа на постоянном токе разработаны братьями Шлюмберже в начале 20 века [Moran, Gianzero, 1982]; конструкция зондов аналогична установкам вертикального электрического

зондирования, предложенным этими же геофизиками. Первое измерение градиент-зондом (длина зонда 2 м) проведено в 1927 г. во Франции [Пирсон, 1966], затем в 1929 г. – в Венесуэле, в 1930 г. – в России, а в 1931 г. – в Румынии [Walstrom, 1955]. С первых же экспериментов по изучению осадочных разрезов как наземными методами электроразведки, так и методами электрического каротажа, отмечается такая особенность пород, как анизотропия их электрических свойств [Schlumberger et al., 1934]. R. Maillett и H.G. Doll проводят теоретический анализ потенциала источника электрического тока в анизотропной среде [Maillett, Doll, 1932], вводят понятие продольного ("the longitudinal resistivity R_h") и поперечного ("the transverse resistivity R_v") сопротивлений. Они же доказывают, что КС по данным достаточно длинного зонда, перпендикулярного границам напластования, стремится к значению R_h анизотропной среды [Moran, Gianzero, 1982]. Эта особенность поведения сигналов постоянного тока получила название "парадокс анизотропии". Также ими установлено, что трансверсально-изотропная среда может быть заменена электрически изотропной [Tittman, 1990], если преобразовать вертикальную ось, умножив на коэффициент $\lambda=\sqrt{R_v / R_h}$ и присвоив изотропной среде эффективное УЭС, равное $\sqrt{R_v R_h}$.

Статистически подтвержденное превышение значений $\rho_к$ по данным 16-тидюймового нормального (конфигурация A–M) зонда по сравнению со значениями $\rho_к$ по данным индукционного зонда в интервале глин становится одной из причин исследования в статье [Kunz, Moran, 1958]. Здесь показано, что при наличии скважины с контрастным по УЭС буровым раствором короткие нормальные зонды и градиент-зонды становятся чувствительны к значению ρ_v однородной анизотропной среды. В этой же работе для однородного анизотропного пласта приводится зависимость сигнала нормального зонда от контраста значений ρ_h и УЭС бурового раствора ρ_m. Для точечных электродов относительные приращения КС, обусловленные увеличением значения ρ_v, зависят от контраста значений ρ_h/ρ_m и от отношения длины зонда к радиусу скважины. При большом значении ρ_h/ρ_m максимум приращения сигнала сдвигается в сторону больших длин зонда. В этой же статье приведены расчетные сигналы нормального и латерального зондов при перпендикулярном пересечении границы между двумя анизотропными средами при разных соотношениях значений УЭС и коэффициентов анизотропии, а также при пересечении тонкого изотропного пласта, расположенного между анизотропными. В последнем случае анализ проводится для геоэлектрической модели среды без скважины. В области пересечения границ пластов сигналы нормального и латерального зондов значительно отличаются от сигналов в изотропной модели, и это отличие может обеспечить оценку анизотропных параметров.

Электрическое поле точечного источника в двуслойной анизотропной среде, в пластах которой одинаковы горизонтальные сопротивления ρ_h, исследовано в статье [Moran, Gianzero, 1982]. Для отклонений сигналов нормального и латерального зондов от значения ρ_h в области пересечения границы устанавливается зависимость их максимальных амплитуд от значений ρ_h и коэффициентов анизотропии. Скважина не учитывается.

За рубежом при интерпретации сигналов БКЗ "парадокс анизотропии", выполняющийся для зондов постоянного тока только при условии пренебрежения влиянием скважины, считается вполне самодостаточным, и анизотропия не рассматривается как параметр, значимо влияющий на сигналы градиент-зондов. В переведенных на русский язык учебниках С.Д. Пирсона [Пирсон, 1961, 1966], влияние

анизотропии УЭС не упоминается совсем, хотя сигналы в изотропных моделях разной сложности представлены весьма подробно.

С того времени, когда были проведены эти исследования, в отношении массово применяемого численного анализа сигналов градиент-зондов не было особенных изменений. В изданном в 2008 г. учебнике "Well Logging for Earth Scientists" [Ellis, Singer, 2008] рассматриваются в основном симметричные фокусирующие зонды бокового каротажа. Влияние анизотропии на сигналы постоянного тока анализируется даже без ссылки на приведенные выше работы K. Kunz, J. Moran, и рассматривается только в зависимости от угла между прибором и плоскостью напластований без учета скважины.

В статье 2013 г. сотрудник фирмы Шлюмберже M. Lüling возвращается к "парадоксу анизотропии", делая оговорку, что рассматривает скважину пренебрежимо малого диаметра (a borehole with negligible diameter) [Lüling, 2013]. Ссылаясь на работы K. Schlumberger, R Maillett и H.G. Doll, автор доказывает, что любая вертикально расположенная установка постоянного тока в горизонтально ориентированных напластованиях будет чувствительна только к горизонтальной электропроводности, если влиянием скважины можно пренебречь. И перечисляет имена других авторов, которые придерживаются того же мнения: Van der Pauw (1961), Wasscher (1961), Bhattacharya, Patra (1968), Hagiwara (1994), Al-Garni, Everett (2003).

ПРИЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА С ОЦЕНКОЙ АНИЗОТРОПИИ

Разные алгоритмы оценки анизотропии УЭС предлагаются на основе использования комплекса данных, измеренных зондами с разным типом возбуждения среды: индуктивным и гальваническим. Типичным подходом является двухшаговый алгоритм: на первом шаге строится изотропная модель (положение границ, горизонтальное сопротивление и параметры зоны проникновения) по данным комплекса индукционных зондов. На втором шаге варьируется вертикальное УЭС с инверсией сигналов фокусированных зондов БК. Такие подходы используются в компании Schlumberger [Faivre et al., 2002; Barber, 2006]: значение ρ_V оценивается по сигналу длинного фокусированного зонда постоянного тока аппаратуры HRLA. Алгоритмы реализованы в вариантах от поточечной оценки до инверсии на основе осесимметричной модели. Опыт применения к практическим данным приводит авторов к выводу о наличии краевых эффектов (появление "ложной" анизотропии в изотропных вмещающих вблизи анизотропного пласта) и контрастным значениям: при ρ_h = 10–20 Ом·м значение ρ_V достигает более 1000 Ом·м; в отложениях глинистого состава – 2 и 8 Ом·м, соответственно.

Разные коллективы соавторов во главе с M. Frenkel основывают свои подходы на использовании аппаратуры высокоразрешающего бокового каротажа HDLL. Для вертикальных и наклонных скважин по данным коротких зондов проводится оценка УЭС ближней зоны, по сигналам глубинных зондов – оценка УЭС пласта, и далее с использованием полученных оценок проводится инверсия сигналов всех зондов с получением параметров ЗП и пласта [Frenkel, Zhou, 2000]. Сигналы высокоразрешающего индукционного каротажа HDIL (с коррекцией влияния скважины), при их наличии, используются как горизонтальное УЭС в стартовой модели при двумерной инверсии данных HDLL. Иной подход – для индукционного и бокового каротажа находятся соответствующие изотропные модели, а разница в полученных УЭС пластов пересчитывается в коэффициент анизотропии [Frenkel, Geldmacher, 2003]. Ускорение инверсии достигается за счет применения короткого окна с перекрытием. В поточечном варианте [Frenkel, Geldmacher, 2004] вместо инверсии из данных HDLL исключается влияние скважины и измененной зоны, а затем с учетом ρ_K по HDIL они

преобразуются в коэффициент анизотропии (алгоритм работает быстро и надежен при малом влиянии вмещающих). Если проникновение значительное, необходимы данные микробокового каротажа. Полученные при инверсии комплекса практических сигналов HDLL и HDIL оценки анизотропии УЭС согласуются с оценками по данным многокомпонентного индукционного каротажа 3DEX, измеренным в той же скважине.

Улучшенные методы инверсии данных, полученных в анизотропных средах, предлагаются в [Zea, Hagiwara, 1999; Griffiths et al., 2000]. В первой работе анизотропия УЭС оценивается по разнице КС фокусированных гальванических зондов, типа LLD и LLS, с оценкой КС как логарифма от отношения вертикального и горизонтального УЭС. Второй вариант – по разнице КС электрического каротажа и $\rho_к$ индукционного каротажа, с определением по данным последнего значения горизонтального УЭС. При наличии проникновения предлагается использовать комбинации трансформант сигналов зондов DLL и индукционных зондов, на которые слабо влияет зона проникновения. Во второй статье предлагаются алгоритмы с улучшенной коррекцией влияния скважины и обработкой сигналов зондов аппаратуры индукционного каротажа (Array Induction Imager Tool, AIT) и гальванического каротажа (High-Resolution Laterolog Array tool, HRLA, фокусированные зонды). Электрическая анизотропия пласта оценивается по сигналам гальванических и индукционных зондов, на которые практически не влияет зона проникновения. Алгоритм тестируется на синтетических данных в контрастной модели (ρ_h = 5 Ом·м, ρ_v = 110 Ом·м) и на практических данных, для которых оценки УЭС песчаного пласта тоже сильно контрастны ($\rho_h \approx$ 15 Ом·м, ρ_v = 200–300 Ом·м). В этих работах предполагается использование в сложных разрезах и при наклоне скважины совместной инверсии данных фокусированных гальванических и индукционных зондов с применением 2-х и 3-хмерного моделирования. Однако позже выясняется, что гальванические зонды не отличаются высокой чувствительностью к вертикальному УЭС, поэтому эти подходы оказались ненадежными [Frenkel, Geldmacher, 2004].

Из последних статей аналогичные подходы используются в [Bała, 2011], автор которой использует данные приборов фирмы Halliburton (индукционный каротаж HRAI и боковой каротаж DLL с учетом данных наклономера SED-6). Ссылаясь на работы [Hagiwara,1996; Faivre et al., 2002; Tabanou et al., 2002], она считает, что длинный индукционный зонд показывает горизонтальное УЭС, а сигнал зонда LLD близок к среднему геометрическому $\sqrt{\rho_h \rho_v}$. Если значения КС зондов LLD и LLS одинаковы, то проникновение отсутствует или им можно пренебречь. Если при этом $\rho_к$ по данным ИК отличается от них, то эта разница обусловлена анизотропией. Для песчано-глинистой тонкослоистой пачки ρ_h оценено как 2.5–3.0 Ом·м в верхней части, около 0.8 Ом·м в нижней, а ρ_v – около 5.0 и 3.0 Ом·м. Соответственно, коэффициент анизотропии составляет около 1.5 и 2.0 в тех же интервалах. В следующей статье [Bała, Cichy, 2015] приводятся результаты определения анизотропии УЭС в тех же песчаниках, предваряя их анализом геоэлектрической тонкослоистой модели этих отложений, в которых УЭС песчаных прослоев оценивается ими как 20 Ом·м, а глинистых – 1 Ом·м при одинаковой толщине 0.5 м. Горизонтальное УЭС в этом случае получается около 2 Ом·м, что соответствует наблюдаемым КС. Коэффициент анизотропии в этих низкоомных коллекторах (глубина залегания 900–1300 м) оценивается как 1.5–1.7.

Использование для определения электрической анизотропии данных градиент-зондов, по сути, описывается только в работе [Yang, 2001]. В ней предлагается совместная инверсия сигналов градиент-зондов и индукционных зондов в двумерной анизотропной модели. По данным индукционных зондов определяется положение границ, после чего проводится 2D инверсия с определением ρ_h. Эти значения

подставляются в стартовую модель, и проводится инверсия (2D) данных градиент-зондов с получением ρ_V. Тестирование алгоритма инверсии проводится на синтетических данных. Модель, на которой показываются зависимости сигналов от анизотропии, сильно контрастная, переменный параметр (горизонтальное УЭС в одном случае и вертикальное – в другом) меняется от 10 до 10000 Ом·м, все остальные УЭС равны 1 Ом·м (вмещающих пластов, раствора в скважине и второго УЭС в анизотропном пласте). Этот подход к интерпретации в первых годах текущего века оценивается как слишком медленный, чтобы использоваться в реальном времени [Frenkel, Geldmacher, 2003]. Использование градиент-зондов обусловлено отсутствием в то время в Китае иной специализированной аппаратуры.

Поскольку несимметричные зонды постоянного тока, после начала их использования и изучения в 20–40 годы прошлого столетия, широко применяются в Советском Союзе и относительно мало – в других странах, то и интерпретационно-методическое обеспечение БКЗ развивается прежде всего советскими исследователями. Эти работы начаты В.А. Фоком, получившим в 1932 г. общее решение задачи каротажа по методу сопротивлений (выражение для потенциала электрического поля точечного источника тока в скважине, проходящей в однородном изотропном пласте) [Фок, 1933], и продолжены Л.М. Альпиным, разработавшим "теорию каротажа по методу сопротивлений для пластов неограниченной мощности". Л.М. Альпин выполняет численный анализ зависимости КС от длины зонда постоянного тока, диаметра скважины и зоны проникновения, УЭС бурового раствора. Он же построил палетки БКЗ для цилиндрически-слоистой модели изотропного пласта неограниченной толщины с зоной проникновения и в горизонтально-слоистой модели пласта ограниченной толщины [Альпин, 1938, 1958]. Под руководством Альпина создается сеточная электрическая модель (электроинтегратор), при измерениях в которой физически решаются "важные задачи каротажа", в том числе и исследуются сигналы градиент-зондов в анизотропных средах и пластах ограниченной мощности [Альпин, 1953; Дахнов, 1959; Кулинкович, 1962].

В последующем теоретический анализ и численные модели геологических сред существенно расширены С.Г. Комаровым [Комаров, 1950, 1973] при этом анизотропные свойства пластов не рассматриваются. В то же время проводятся расчеты для тонкослоистых пачек с чередованием контрастных по УЭС прослоев, но с целью учета изменения сигналов в таких моделях и оценки возможности определения УЭС прослоев при разной их толщине.

Теоретические выкладки С.М. Шейнманна по расчету потенциала точечного источника в однородной анизотропной среде, полученные в 1933 г., приведены в монографии В.Р. Бурсиана (первая редакция выпущена в 1933 г., вторая – в 1972 г. [Бурсиан, 1972]). Также в монографии получены выражения для средней электропроводности вдоль и поперек тонкослоистой среды и исследованы эквипотенциальные поверхности и линии тока.

Р.И. Тюркишер в 1945 г. "обобщает работы Фока" для точечного источника тока на оси скважины при различных УЭС в вертикальном и горизонтальном направлениях, вычислив электрическое поле для двух значений коэффициента "анизотропности" (ρ_V / ρ_h равно 2 и 3) и трех значений потенциала в зависимости от положения измерительных электродов градиент-зонда. Но вслед за Фоком, который вывел приближенные выражения для потенциалов в изотропной модели для зондов длиной более 20 радиусов скважины, Тюркишер рассматривает только длинные градиент-зонды: расстояния между электродами, нормированные на радиус скважины, равны 24 и 32, 32 и 42.7. При таких длинах зондов закономерен вывод – КС мало

отличается для анизотропной и изотропной сред, следовательно, определить анизотропию невозможно [Тюркишер, 1945].

Описание методики определения коэффициента анизотропии по данным градиент-зондов далее упоминается в работах российских геофизиков середины прошлого века. В 1967 г. В.Н. Дахнов приводит формулы для расчета сигналов потенциал и градиент-зондов в анизотропных пластах с проникновением (второе издание: [Дахнов, 1981]. Приводятся кривые зондирования и диаграммы профилирования БКЗ, измеренные на электроинтеграторе. В статье [Зайковский и др., 1965] предлагается использовать условие эквивалентности потенциала электрического поля в анизотропном пласте и электрически неоднородном по радиусу изотропном. В этом случае при инверсии кривой зондирования БКЗ получается модель с неглубоким повышающим проникновением, для которой характерна *U*-эквивалентность. По кривой БКЗ определяется УЭС пласта, равное ρ_h, и параметр *U*, через эти значения находят λ. Применение методики к измеренным в железистых роговиках данным приводит к коэффициенту анизотропии λ = 8.8 и 11.2 при горизонтальном УЭС, равном 8 и 9 Ом·м.

В 1968 году В.П. Журавлев рассматривает макроанизотропную модель отложений и приводит результаты сеточного моделирования на каротажном электроинтеграторе ЭКСМ. Основные выводы: по левой ветви кривой зондирования определяется значение, "в некоторых случаях" близкое к расчетному значению "среднего сопротивления" ($\sqrt{\rho_h\ \rho_v}$), а сигналы эквивалентны сигналам в изотропной модели с радиальным изменением УЭС. Но при сравнении полученных сигналов с трехслойными палетками получается, что диаметр фиктивной зоны проникновения возрастает с увеличением продольного сопротивления и при ρ_h = 1.5 ρ_c (где ρ_c – УЭС раствора в скважине) превышает диаметр скважины более чем в 4 раза, что делает невозможным использовать *U*-эквивалентность, работающую при толщине зоны проникновения от 2 до 4 диаметров скважины. Предлагается усложненная методика, с интерпретацией сигнала каждого зонда по 2-слойной палетке по отдельности и анализом этих эквивалентных сопротивлений. В случае макрослоистой среды (толщина прослоев больше диаметра скважины, "отдельные прослои выделяются экстремумами на кривой КС") предлагается использовать средние значения КС для разных зондов. При этом отмечается, что анизотропию можно оценить, если проникновение неглубокое и контраст УЭС ЗП и пласта небольшой [Журавлев, 1968]. Также Журавлев предлагает дополнительно анализировать сигналы коротких зондов, микрозондов и БК, по которым выделять пачку и оценивать среднее значение толщины прослоев для последующего пересчета полученных анизотропных параметров в параметры прослоев. Главными параметрами в методике являются горизонтальное УЭС и максимальное эквивалентное УЭС $\rho_э$, определяемое по 2-хслойной палетке для зонда длины, равной (близкой) к диаметру скважины. Отношение этих величин по специальным палеткам пересчитывается в коэффициент анизотропии. Приводится пример интерпретации данных БКЗ, измеренных в скважине 315 Абино-Украинского месторождения на интервале чередования глин и карбонатных песчаников, мергелей и известняков. Раствор пресный (2 Ом·м), глубина около 2200 м, на диаграммах визуально выделяются 9 прослоев. Средняя толщина высокоомных прослоев около 10 диаметров скважины, их доля в пачке 0.7, ρ_h = 8 Ом·м, $\rho_v \approx$ 29 Ом·м, λ = 1.9, УЭС прослоев 2.6 и 41 Ом·м.

В следующей статье Журавлева [Журавлев, 1971] рассматриваются сигналы градиент-зондов длиной 1, 4, 8 и 16 м в тонкослоистом пласте ограниченной мощности, также полученные на

электроинтеграторе ЭКСМ. Толщина пачки 8 диаметров скважины, толщина прослоев 0.5 диаметра скважины, УЭС вмещающей среды равно 5 ρ_c (УЭС раствора в скважине), УЭС высокоомных прослоев 100ρ_c, низкоомных – ρ_c, 5ρ_c, 25ρ_c. Полученные кривые зондирования и диаграммы КС отличаются от кривых в случае пересечения изотропного пласта, по левой ветви кривой зондирования определяется УЭС, близкое к максимальному эквивалентному. Автор приходит к выводу, что "определение параметров анизотропии возможно для пачки тонких пластов, мощность которых не менее чем в 4 раза меньше длины больших зондов, применяемых в комплексе БКЗ". При этом статья заканчивается утверждением: "... Использование этого способа в практических целях ограничено, поскольку выделение очень тонких пластов и оценка характера неоднородности их по диаграммам скважинных исследований затруднены".

Важность исследования электрической анизотропии отмечается в [Кашик, Макарова, 1970] при рассмотрении геоэлектрических моделей карбонатного коллектора с горизонтальной трещиноватостью и слоистого угольного пласта. УЭС карбонатного коллектора 100 и 20 Ом·м, УЭС проводящего бурового раствора 0.05 Ом·м, коэффициент трещиноватой пористости 1 и 10 % и заполнение трещин буровым раствором; коэффициент анизотропии для таких значений варьирует от 2.2 до 13.4. Для угольного пласта с аргиллитовыми прослоями (УЭС угля 500 и 1000 Ом·м, аргиллита 70 Ом·м) получают при разном содержании аргиллитовых примесей коэффициент анизотропии от 1.2 до 2.03.

В 1971 г. А.И. Сидорчуком строится рекурсивное решение прямой задачи для произвольного числа коаксиальных сред с анизотропией и рассчитывает сигналы БКЗ в моделях "скважина – анизотропный пласт", со ступенчатым изменением УЭС в зоне проникновения изотропного пласта, в тонкослоистом разрезе с изотропными прослоями с проникновением в проницаемых слоях (изменение в зоне – ступенчатая аппроксимация монотонного увеличения УЭС) [Сидорчук, 1971]. В следующей статье предлагается алгоритм расчета кривых КС наклонных градиент- и потенциал-зондов в многослойной анизотропной среде без учета скважины (каждый слой анизотропен, одна из осей анизотропии нормальна границам) [Сидорчук, Чаадаев, 1972]. Для перпендикулярного пересечения рассчитаны сигналы в пачке изотропных пластов и эквивалентном анизотропном пласте, и показано, что заменить тонкослоистую пачку на эквивалентный анизотропный пласт можно при отношении мощности отдельных пластов пачки к длине зонда менее 1/4 для потенциал-зонда и менее 1/8 для градиент-зонда. Признаки наличия анизотропии: на диаграммах сигнала потенциал-зонда вблизи границ нет плато, как для изотропных, форма меняется с изменением λ, уменьшается видимая мощность высокоомного пласта и завышается – низкоомного; на диаграммах сигнала градиент-зонда появляется пик под подошвой, амплитуда которого зависит от коэффициента анизотропии, а положение – от длины зонда.

Интегральные уравнения, описывающие сигналы наклонных градиент-зондов в модели анизотропных пластов с зонами проникновения и с учетом скважины, выводятся в [Табаровский, Дашевский, 1976, 1979б]. Однако сведений о вычислительном алгоритме на основе полученных уравнений в более поздних статьях не приводится.

Теоретическое обоснование методов интерпретации БКЗ в осесимметричных средах, образованных набором пластов ограниченной мощности с проникновением фильтрата бурового раствора дано в [Друскин, 1984].

При решении конечно-разностным методом прямой задачи БКЗ в осесимметричной анизотропной модели А.Д. Каринский сравнивает сигналы градиент-зондов в тонкослоистых моделях с изотропными прослоями и в эквивалентных анизотропных моделях [Каринский, 2006], исследует адекватность замены

тонкослоистой среды анизотропным аналогом на основе анализа зарядов, возникающих в анизотропной среде, на границе изотропной и анизотропной сред, на границах изотропных прослоев [Каринский, 2010; Каринский, Даев, 2011].

АППАРАТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ

Ввиду сложности проблемы определения электрической анизотропии развивается теоретическое обоснование более сложных измерительных установок. Поскольку в наклонных скважинах чувствительность к вертикальному сопротивлению есть у всех применяемых методов электрометрии, то далее рассматриваются только те методы, которые позволяют оценивать вертикальное УЭС при измерениях в вертикальных скважинах.

В 1970 году И.Э. Эйдман получил патент на индукционный каротаж поперечной проводимости с помощью двухкатушечного зонда, магнитные моменты катушек которого располагались в горизонтальной плоскости [Эйдман, 1970]. В статье [Альпин, 1978] отмечается, что зависимость сигнала градиент-зондов от поперечного УЭС существует, но "мы не умеем извлекать" эту информацию. Как вариант, Альпин предложил проводить измерение парой электродов MN, двигая их вдоль скважины при неподвижных удаленных друг от друга токовых электродах, расположенных на поверхности: один на устье скважины, второй на большом удалении, или в скважине: один на устье, второй на забое. Но большое расстояние между токовыми электродами в этом случае приводит к тому, что сигнал на паре приемных электродов оказывается очень мал, что ограничивает возможности такой установки. К тому же практическая реализация зонда, предложенного Альпиным, оказалась слишком сложной технически [Снегирев, Великий, 1982], а зонд конструкции Эйдмана обладал известными недостатками двухкатушечных зондов.

В патенте [Табаровский, Дашевский, 1979в] и статьях [Табаровский, Дашевский, 1979а; Дашевский, Эпов, 1981] в качестве источника поля предлагалось использовать электрический диполь, перпендикулярный оси скважины, и измерять параллельную диполю компоненту электрического поля, а также ортогональную ей радиальную компоненту магнитного поля. По отношению компоненты электрического поля к квадрату компоненты магнитного поля можно оценить УЭС среды. Этот способ авторы назвали магнитоэлектрическим каротажем. Предложенная идея привела к проектированию десятизондового комплекса, состоящего из пары токовых электродов и десяти пар приемных электродов [Дашевский и др., 2002]. Электроды в парах располагаются диаметрально противоположно на непроводящем корпусе. Кроме того, в этот же прибор входит квадрупольный индикатор границ. Рассчитанные в осесимметричной модели, состоящей из трех анизотропных пластов с повышающими зонами проникновения и скважины, диаграммы сигналов отражают влияние анизотропии довольно сложным образом. В статье [Дашевский, Табаровский, 1987] также предлагалось повысить чувствительность к коэффициенту анизотропии геометрической фокусировкой с помощью двух градиент-зондов, для которых равны по модулю и противоположны по знаку значения отношения тока к квадрату длины.

Совершенствование теоретической базы электромагнитных методов и резкое увеличение производительности машинных вычислений в 90-х годах прошлого столетия позволило исследователям использовать новые подходы для определения вертикальной компоненты УЭС пород в условиях естественного залегания.

За границей в качестве основного метода постоянного тока наибольшее распространение получили установки фокусированного бокового каротажа с зондами разной длины (Laterolog Array Tool).

Например, HRLA (High-Resolution Laterolog Array Tool) компании Schlumberger [Legendre et al., 1999], RTeX (Rt eXplorer) компании Baker Hughes [Zhou et al., 2008] и их аналоги. Несмотря на наличие научных работ по восстановлению параметров анизотропии по сигналам этих приборов в вертикальных скважинах в комплексе с индукционными зондированиями [Faivre et al., 2002; Frenkel, Geldmacher, 2003; Barber, 2006], чувствительность сигналов бокового каротажа к вертикальной компоненте УЭС недостаточно высока для практического применения технологии обработки данных с определением анизотропии УЭС. Это напрямую связано с конструкцией приборов: фокусировка тока, применяющаяся для увеличения разрешающей способности, подавляет чувствительность измеряемых сигналов к вертикальному УЭС.

В последние десятилетия для оценки анизотропии УЭС разработаны индукционные приборы со сложной системой катушек, моменты которых перпендикулярны или наклонены под 45° к оси прибора. Такой ориентацией моментов достигается наличие чувствительности сигналов зондов к компонентам тензора электропроводности. Одним из последних достижений является многокомпонентный индукционный каротаж. Зонд Rt Scanner компании Schlumberger, 3DeX компании Baker Hughes ([Zhang et al., 2003]) и их конструктивные аналоги позволяют не только решать задачу определения параметров анизотропии УЭС в трансверсально-изотропной постановке, но и восстанавливать полный тензор электропроводности благодаря наличию групп приемных катушек со взаимно ортогональными магнитными моментами и катушки, генерирующей трехмерный сигнал [Андерсон и др., 2008]. Идеологическими аналогами являются приборы, в которых используются наклонные генераторные и приемные катушки [Li et al., 2005; Bittar, 2011]. Достоинствами подхода являются высокая чувствительность измеряемых сигналов к параметрам анизотропии и возможность извлечения из данных большого количества уникальной информации о сложнопостроенной среде, а очевидными недостатками – чрезвычайные дороговизна аппаратуры и вычислительная сложность обработки данных.

На сегодняшний день именно многокомпонентный индукционный каротаж является общепринятым стандартом оценки анизотропии УЭС как в вертикальных, так и в наклонных скважинах. Алгоритмы моделирования и методики интерпретации этих измерений активно развиваются большим количеством специалистов [Davydycheva et al., 2003; Zhang et al., 2003; Barber et al., 2004; Georgi et al., 2008; Davydycheva, Frenkel, 2010; Davydycheva, Wang, 2011; Wang et al., 2018]. Большинство продвинутых алгоритмов обработки сводятся к разбиению среды на пласты с постоянными свойствами и нахождению для каждого пласта компонент тензора электропроводности, наилучшим образом удовлетворяющего измеренным данным путем минимизации функционала невязки. Далее нахождением ориентации главных осей тензора определяется угол падения слоистости. Алгоритмы различаются степенью и способом учета влияния на измеряемые сигналы вмещающих пород, скважины, положения в ней прибора, проникновения бурового раствора в пласт и т. д.

Интересным является факт, что несмотря на наличие в приборах катушек, ориентированных по всем трем осям, результатом инверсии практически во всех рассмотренных алгоритмах являются значения горизонтального и вертикального УЭС: электропроводность в горизонтальной плоскости считается не зависящей от направления. Моделированию сигналов многокомпонентного каротажа в средах с двухосной анизотропией посвящено несколько из рассмотренных работ [Davydycheva et al., 2003; Georgi et al., 2008; Davydycheva, Wang, 2011; Wang et al., 2018], однако лишь в одной предпринята попытка независимого восстановления компонент УЭС в горизонтальной плоскости [Georgi et al., 2008]. Сами авторы связывают это со сложностью и неоднозначностью решения обратной задачи в такой постановке, а также с отсутствием петрофизических моделей, учитывающих двухосную анизотропию.

Для повышения чувствительности к вертикальному УЭС также предлагаются разные варианты использования тороидальных антенн [Arps, 1967; Redwine, 1968; Gianzero et al., 1986; Clark et al., 1993; Gianzero, Bittar, 2007). При расположении антенн такого типа на проводящем корпусе с последнего стекает ток непосредственно в породу через буровой раствор в скважине. Однако реализация этих предложений в виде приборов, по-видимому, оказывается довольно сложной.

Свойства зонда из соосных генераторного электрического диполя и измерительной тороидальной антенны исследуются в работах А.Д. Каринского [Karinski, Mousatov, 2001, 2002] и его учеников: проведено физическое моделирование сигнала зонда с тороидальными антеннами, а также зондов с электрическими диполями (дипольно-осевого и дипольно-экваториального) в анизотропной модели [Кауркин, 2015], а также создана физическая модель зонда с генератором в виде катушки с током, соосной с прибором, и измерителем в виде поперечного электрического диполя, которой измерены сигналы в физической модели анизотропной среды с наклонной скважиной, зависящие от анизотропных свойств модели при углах наклона скважины более 30° [Красносельских, 2016]. Другие варианты источников и приемников применительно к теоретическому и численному анализу электромагнитного поля в электрически анизотропных средах рассмотрены А.Д. Каринским в монографии [Каринский, 2018].

Вариант каротажного прибора с тороидальными катушками создан в НПП ГА "Луч" (г. Новосибирск). Сотрудниками ИНГГ СО РАН опубликована серия статей с теоретическим обоснованием и примерами измеренных в скважине сигналов [Эпов и др., 2018а, б, 2019; Михайлов и др., 2020; Суродина и др., 2020], в том числе аналитический обзор опыта применения тороидальных катушек в задачах каротажа [Михайлов и др., 2021]. Разработанный прибор – ЗЭТ – состоит из цилиндрического металлического немагнитного корпуса, двух генераторных и нескольких измерительных тороидальных катушек, а также датчиков тока на корпусе. Длина прибора – 1 м, рабочие частоты – от 50 до 250 кГц. Измеряются реальные и мнимые (амплитуды и фазы) части вертикальной составляющей плотности тока на корпусе и э.д.с. в тороидальных катушках. Применяется два режима измерения: суммарный, с однонаправленными токами в генераторных катушках, применяется для оценки электрической анизотропии; и дифференциальный, с противоположными направлениями токов. Результаты успешной апробации прибора в скважине в Самарской области опубликованы в 2018 г.

ВЫВОДЫ

На основе приведенного обзора можно сделать следующие выводы.

Анизотропия УЭС характерна для осадочных отложений, влияет на сигналы электрокаротажных зондов, если генерируемые зондами токи пересекают плоскость наслоений. Многие глобальные нефтяные компании разрабатывают приборы и методики интерпретации для оценки тензора электропроводности. Российскими учеными начиная с середины прошлого века предлагаются разные конструктивные решения зондов постоянного и переменного тока для оценки электрической анизотропии, однако исследование в скважинах по-прежнему проводится градиент-зондами БКЗ и индукционными зондами с соосными моментами генераторных и приемных катушек.

Сигнал градиент-зонда, расположенного вертикально в трансверсально-изотропном пласте, при наличии скважины с раствором зависит от значения ρ_V тем больше, чем меньше его длина, при небольших контрастах УЭС раствора в скважине и окружающих пород. При условии достаточной толщины однородного анизотропного пласта оценку электрической анизотропии можно получить по кривой

зондирования, составленной из данных БКЗ, что предлагалось в некоторых методиках количественной интерпретации. Диаграммы БКЗ при пересечении границ анизотропных пластов существенно отличаются от диаграмм в изотропных слоистых моделях, что при инверсии сигналов на протяженном интервале измерения может обеспечить оценку электрической анизотропии.

Поскольку на сигнал градиент-зонда сильно влияют УЭС бурового раствора и диаметр скважины, необходимо как можно точнее знать их значения, особенно ввиду того что наибольшей чувствительностью к ρ_V обладают короткие градиент-зонды, наиболее подверженные влиянию этих параметров. Указанное влияние, по-видимому, являлось причиной того, что методики определения коэффициента анизотропии, предложенные в 70-х годах прошлого века, практически не применялись. Следовательно, для того чтобы установить наличие электрической анизотропии и получить надежную оценку вертикального сопротивления, необходимы достоверные данные измерений БКЗ, УЭС раствора и диаметра скважины, проведенные в примерно одинаковых условиях калиброванными приборами.

При исследовании в вертикальных скважинах вихревые токи, создаваемые индукционными зондами с ориентацией моментов катушек вдоль оси прибора (ИК и ВЭМКЗ), текут в плоскости напластований, поэтому не содержат информации о значении ρ_V. Поэтому можно совместно использовать сигналы БКЗ и ВЭМКЗ или низкочастотного ИК, определяя инверсией сигналов индукционных зондов положение границ и горизонтальное УЭС, а инверсией второго уточнять значение вертикального УЭС.

Поскольку, во-первых, наибольшее изменение сигналов градиент-зондов, обусловленное наличием анизотропии УЭС, характерно для больших длин зондов при пересечении границ анизотропного пласта, а во-вторых, толщина исследуемых в последнее время пластов составляет несколько метров (то есть, значительно влияние вмещающих пластов), то очевидно, что для оценки как вертикального, так и горизонтального сопротивлений необходимы двумерные постановки прямых задач. Сейчас развивается решение обратных задач на основе численного двумерного моделирования, конечно-разностными или конечно-элементными алгоритмами, как, например, для потенциал-зондов в изотропной среде [Ulugergerli, 2011] или для зондов БКЗ и ВИКИЗ (ИК) [Кнеллер, Потапов, 2010; Книжнерман и др., 2017]. Ввиду довольно больших временных затрат на моделирование сигналов резерв развития заключается в разработке нейросетевых решателей прямых задач [Даниловский и др., 2021].

ЛИТЕРАТУРА

Александров Б.Л. Аномально-высокие пластовые давления в нефтегазоносных бассейнах. – М.: Недра, 1987. – 216 с.

Альпин Л.М. К теории электрического каротажа буровых скважин. – М.-Л.: Гостопиздат, 1938. – 38 с.

Альпин Л.М. Сеточное моделирование каротажа сопротивлений // Прикладная геофизика. – 1953. – Вып.10. – С. 48–73.

Альпин Л.М. Палетки бокового каротажного зондирования (БКЗ). – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 45 с.

Альпин Л.М. Определение поперечного удельного сопротивления пластов по измерениям в скважине // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1978. – № 4. – С. 81–95.

Андерсон Б., Барбер Т., Леверидж Р., Бастиа Р., Сахена К.Р., Тьяги А.К., Клаво Ж.-Б., Коффин Б., Дас М., Хейден Р., Климентос Т., Мин Ч.К., Уильямс С. Трехмерный индукционный каротаж: старые измерения под новым углом // Нефтегазовое обозрение. Schlumberger. – 2008. – Т. 19, № 2. – С. 74–97.

Бедчер А.З. Электрическая анизотропия глин и ее геологическое значение // Тр. Краснодар. фил. ВНИИ. – М., 1962. – Вып. 10. – С. 235–241.

Бурсиан В.Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. – Л.: Недра, 1972. – 308 с.

Викулова М.Ф., Бурков Ю.К., Македонов А.В., Тихомирова Н.Я., Осипова А.И., Феофилова А.П., Кулакова Г.В., Земова Н.Н. Фациальные типы глинистых пород (и их первичные литологические особенности). – Л.: Недра, 1973. – 288 с.

Гришкевич В.Ф. Макроструктура берриас-аптских отложений Западной Сибири и ее использование при построении информационных технологий в геологии нефти и газа. – Тюмень: ИздатНаукаСервис, 2005. – 116 с.

Давыдова О.П. Оценка деформаций глинистых пород в процессе разработки месторождений нефти и газа по данным ГИС и математического моделирования: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. РГГУ им. И.М. Губкина. – М., 2013. – 26 с.

Даниловский К.Н., Петров А.М., Леоненко А.Р., Сухорукова К.В. Возможности алгоритмов на основе сверточных нейронных сетей при решении задач электрокаротажа // Интеллектуальный анализ данных в нефтегазовой отрасли: Материалы Второй региональной конференции EAGE в России и странах СНГ (г. Новосибирск, 4–6 августа 2021 г.). – Новосибирск, 2021. – С. 1–5.

Дахнов В.Н. Промысловая геофизика. Методы промысловой геофизики, аппаратура и оборудование, электрические методы исследования скважин. – М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1959. – 697 с.

Дахнов В.Н. О влиянии глинистости на величину удельного электрического сопротивления и параметра пористости песчаных коллекторов // Применение методов промысловой геофизики при изучении газоносных коллекторов. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – С. 81–96.

Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин: Учебник для вузов. 12-е изд., перераб. – М.: Недра, 1981. – 344 с.

Дашевский Ю.А., Эпов М.И. Исследование изотропных и анизотропных пластов на постоянном и переменном токе // Методика и результаты комплексных геофизических исследований земной коры Сибири: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Институт геологии и геофизики СО АН СССР, 1981. – С. 131–137.

Дашевский Ю.А., Табаровский Л.А. Определение коэффициента анизотропии установками бокового каротажного зондирования // Геология и геофизика. – 1987. – Т. 28, № 9. – С. 131–132.

Дашевский Ю.А., Суродина И.В., Эпов М.И. Квазитрехмерное математическое моделирование диаграмм неосесимметричных зондов постоянного тока в анизотропных разрезах // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2002. – Т. 5, № 3 (11). – С. 76–91.

Друскин В.Л. Разработка методов интерпретации бокового каротажного зондирования в неоднородных осесимметричных средах: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.12. – М., 1984. – 121 с.

Журавлев В.П. Определение удельного сопротивления анизотропных пластов // Прикладная геофизика. – 1968. – № 51. – С. 170–186.

Журавлев В.П. Кривые сопротивления анизотропного пласта конечной мощности // Прикладная геофизика. – 1971. – № 64. – С. 194–197.

Зайковский Н.Я., Коваленко Д.Е., Кулинкович А.Е. Определение параметров анизотропного пласта по кривым БКЗ // Прикладная геофизика. – 1965. – № 46. – С. 213–217.

Каринский А.Д. Электромагнитное поле в осесимметричных моделях макроанизотропной и микроанизотропной среды // Геофизика. – 2006. – № 6. – С. 23–28.

Каринский А.Д. Индуцированные заряды в микро и макроанизотропных средах и их влияние на электрическое поле в анизотропных пластах, пройденных скважиной // Геофизика. – 2010. – № 2. – С. 37–48.

Каринский А.Д. Электромагнитное поле в моделях электрически анизотропной среды – М.: ГЕОС, 2018. – 184 с.

Каринский А.Д., Даев Д.С. Результаты 2D-моделирования для зондов электромагнитного и электрического каротажа при различной толщине прослоев в макроанизотропных пластах // Геофизика. – 2011. – № 3. – С. 32–42.

Кауркин М.Д. Лабораторное моделирование дипольных зондов каротажа сопротивления и зондов электромагнитного каротажа с тороидальными антеннами: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.10. – М.: РГГУ, 2015. – 138 с.

Кашик А. С, Макарова М.К. Анизотропия горных пород по их удельному электрическому сопротивлению // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1970. – № 7. – С. 107–110.

Кнеллер Л.Е., Потапов А.П. Определение УЭС пластов при радиальной и вертикальной неоднородности разреза скважин // Геофизика. – 2010. – № 1. – С. 52–64.

Книжнерман Л.А., Хусид М.Д., Дьяконова Т.Ф. Применение метода последовательных боковых поправок к решению осесимметричной обратной задачи электрического и индукционного каротажа для геологических сред с диагонально-анизотропными пластами // Геофизика. – 2017. – № S. – С. 118–125.

Комаров С.Г. Каротаж по методу сопротивлений. Интерпретация. – Л.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1950. – 229 с.

Комаров С.Г. Геофизические методы исследования скважин. – М.: Недра, 1973. – 368 с.

Красносельских А.А. Физическое моделирование зонда электромагнитного каротажа, предназначенного для определения коэффициента электрической анизотропии горных пород: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.10. – М.: РГГУ, 2016. – 112 с.

Кулинкович А.Е. Каротажный электроинтегратор ЭКСМ // Прикладная геофизика. – 1962. – Вып. 34. – С. 219–232.

Михайлов И.В., Велесов Д.В., Глинских В.Н. Изучение тонкослоистых коллекторов с применением тороидальных источников и приемников (на примере Приобского нефтяного месторождения) // Геофизические технологии. – 2020. – № 1. – С. 16–27, doi: 10.18303/2619-1563-2020-1-16.

Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н. Применение тороидальных катушек в задачах каротажа нефтегазовых скважин (аналитический обзор) // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22, № 1. – С. 5–24, doi: 10.21455/gr2021.1-1.

Нестеренко Ю.М., Глянцев А.В. Микротрещиноватость пород покрышек месторождений нефти и газа и переток воды через них Южного Предуралья // Горное Эхо. Вестник Горного института. – 2005. – № 2. – С. 32–34.

Николаева Е.В. Особенности геологического строения продуктивных объектов пластов ЮС2 и АС4–12 Сургутского района в связи с их разведкой и доразведкой: автореф. дис.... канд. геол.-мин. наук. – Новосибирск, 1993. – 17 с.

Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. – М.: Недра, 1989. – 211 с.

Осипов В.И., Соколов В.Н., Еремеев В.В. Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений. – М.: Наука, 2001. – 238 с.

Пирсон С.Д. Учение о нефтяном пласте: Второе изд. Пер. с англ. – М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1961. – 570 с.

Пирсон С.Д. Справочник по интерпретации данных каротажа. – М.: Недра, 1966. – 416 с.

Прозорович Г.Э. Покрышки нефти и газа // Труды ЗапСибНИГНИ. – М.: Недра, 1972. – Вып. 49. – 119 с.

Сидорчук А.И. Электрокаротаж в анизотропной среде с неоднородной зоной проникновения // Изв. АН СССР. Физ. Земли. – 1971. – № 6. – С. 41–47.

Сидорчук А.И. Влияние структурных особенностей горных пород на кривые боковых электрических зондирований // Труды МИНХ и ГП. – 1975. – Вып. 115. – С. 232–238.

Сидорчук А.И., Чаадаев Е.В. Оценка влияния анизотропии на кривые КС в многослойных средах // Геология и геофизика. – 1972. – № 11. – С. 86–94.

Снегирев А.М., Великий С.А. Об экспериментальном определении «истинных» поперечных сопротивлений горных пород в сухих скважинах // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1982. – № 9. – С. 157–159.

Соколов В.Н. Микромир глинистых пород // Соросовский Образовательный Журнал. – 1996. – № 3. – С. 56–64.

Соколов В.Н. Глинистые породы и их свойства // Соросовский Образовательный Журнал. – 2000. – № 9. – С. 59–65.

Суродина И.В., Михайлов И.В., Глинских В.Н. Математическое моделирование сигналов тороидального источника в трехмерных изотропных моделях геологических сред // Естественные и технические науки. – 2020. – № 12. – С. 131–134, doi: 10.25633/ETN.2020.12.17.

Табаровский Л.А., Дашевский Ю.А. Решение задачи бокового каротажного зондирования в наклонных скважинах методом интегральных уравнений // Геология и геофизика. – 1976. – № 7. – С. 70–79.

Табаровский Л.А., Дашевский Ю.А. Магнитоэлектрический каротаж // Геология и геофизика. – 1979а. – № 4. – С. 94–105.

Табаровский Л.А., Дашевский Ю.А. Боковое каротажное зондирование в наклонных скважинах // Электромагнитные методы исследования скважин. – Новосибирск: Наука, 1979б. – С. 67–129.

Табаровский Л.А., Дашевский Ю.А. Способ электрического каротажа: Авторское свидетельство №693314 (СССР) // Бюлл. изобретений. – 1979в. – № 39. – 4 с.

Тюркишер Р.И. Электрокаротаж в анизотропной среде // Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая. – 1945. – Т. 9, № 3. – С. 279–287.

FMI – азимутальный электрический микроимиджер [Электронный ресурс]: URL: http://www.slb.ru/services/wireline/open_hole/imagers/fmi/

Фок В.А. Теория определения сопротивлений горных пород по способу каротажа. – Л.: Техтеоретиздат, 1933. – 60 с.

Эйдман И.Е. Виды песчаных коллекторов палеозоя Нижнего Поволжья // Труды НВНИИГГ. – Саратов, 1966. – Вып. 22. –99 с.

Эйдман И.Е. Способ индукционного каротажа скважин: Авторское свидетельство 272448 СССР, МКИ G01V 3/04/G01V 3/18. – 1970.

Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н. Математическое обоснование нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками для высокоразрешающего каротажа нефтегазовых скважин // Вестник

НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2018а. – Т. 16, № 1. – С. 113–129, doi: 10.25205/1818-7900-2018-16-1-113-129.

Эпов М.И., Глинских В.Н., Еремин В.Н., Михайлов И.В., Никитенко М.Н., Осипов С.В., Петров А.Н., Суродина И.В., Яценко В.М. Новый электромагнитный зонд для высокоразрешающего каротажа: от теоретического обоснования до скважинных испытаний // Нефтяное хозяйство. – 2018б. – № 11. – С. 23–27, doi: 10.24887/0028-2448-2018-11-23-27.

Эпов М.И., Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В. Алгоритмы обработки и инверсии данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками при изучении макроанизотропных свойств пластов-коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 6. – С. 187–197, doi: 10.18799/24131830/2019/6/2139.

Arps J.J. Inductive resistivity guard logging apparatus including toroidal coils mounted on a conductive stem: US Patent No. 3,305,771, February 21. – 1967. – 5 p.

Bała M. Evaluation of electric parameters of anisotropic sandy-shaly Miocene formations on the basis of resistivity logs // Acta Geophysica. – 2011. – Vol. 59 (5). – P. 954–966, doi: 10.2478/s11600-011-0033-1.

Bała M., Cichy A. Evaluating electrical anisotropy parameters in Miocene formations in the Cierpisz Deposit // Acta Geophysica. – 2015. – Vol. 63 (5). – P. 1296–1315, doi: 10.2478/s11600-014-0252-3.

Barber T., Anderson B., Abubakar A., Broussard T., Chen K.C., Davydycheva S., Druskin V., Habashy T., Homan D., Minerbo G., Rosthal R., Schlein R., Wang H. Determining formation resistivity anisotropy in the presence of invasion // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 26–29, 2004). – Houston, USA, 2004. – Paper SPE-90526-MS, doi: 10.2118/90526-MS.

Barber T.D. Method and system for indicating anisotropic resistivity in an earth formation: United States Patent US 7,027,967 B1. Date of Patent: Apr. 11, 2006. – 28 p.

Bittar M.S. Electromagnetic wave resistivity tool having a tilted antenna for determining properties of earth formations. Patent US 7948238 B2. Publication date: May 24, 2011. – 20 p.

Clark B., Bonner D., Jundt J., Luling M. Well logging apparatus having toroidal induction antenna for measuring, while drilling, resistivity of earth formations: US Patent No. 5,235,285, August 10, 1993. – 22 p.

Davydycheva S., Druskin V., Habashy T. An efficient finite-difference scheme for electromagnetic logging in 3D anisotropic inhomogeneous media // Geophysics. – 2003. – Vol. 68 (5). – P. 1525–1536, doi: 10.1190/1.1620626.

Davydycheva S., Frenkel M.A. Review of 3D EM modeling and interpretation methods for triaxial induction and propagation resistivity well logging tools // PIERS Proceedings (July 5–8, 2010). – Cambridge, USA, 2010. – P. 390–396.

Davydycheva S., Wang T. A fast modeling method to solve Maxwell's equations in 1D layered biaxial anisotropic medium // Geophysics. – 2011. – Vol. 76 (5). – P. 293–304, doi: 10.1190/geo2010-0280.1.

Ellis D.V., Singer Ju.M. Well logging for Earth scientists. – Springer, Dordrecht, Netherlands, 2008. – 692 p.

Faivre O., Barber T., Jammes L., Vuhoang D. Using array induction and array laterolog data to characterize resistivity anisotropy in vertical wells // SPWLA 43th Annual Logging Symposium (June 2–5, 2002). – Oiso, Japan. – 2002. – SPWLA-2002-M. – 12 p.

Frenkel M.A., Zhou Z. Improved Estimation of Hydrocarbon Reserves Using High-Definition Lateral Log Array Data in Vertical and Highly Deviated Wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (1–4 October 2000). – Dallas, Texas, 2000. – P. 99–112.

Frenkel M.A., Geldmacher I.M. Real-time Estimation of Resistivity Anisotropy Using Array Lateral and Induction Logs // Offshore Technology Conference (5–8 May 2003). – Houston, Texas, 2003. – Paper OTC-15125-MS.

Frenkel M.A., Geldmacher I.M. Method for resistivity anisotropy determination in near vertical wells: United States Patent US 2004/0133351 A1. Pub. Date: Jul. 8, 2004. – 15 p.

Gaillot Ph., Brewer T., Pezard Ph., Yeh En-C. Borehole Imaging Tools – Principles and Applications // Scientific Drilling. – 2007. – Vol. 5 (5). – P. 1–4.

Georgi D.T., Schoen J.H., Rabinovich M. Biaxial Anisotropy: Its Occurrence and Measurement with Multicomponent Induction Tools // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 21–24, 2008). – Denver, USA, 2008. – Paper SPE-114739-MS, doi: 10.2118/114739-MS.

Gianzero S., Bittar M. Method and apparatus using one or more toroids to measure electrical anisotropy: US Patent No. 7,227,363, June 5, 2007. – 20 p.

Gianzero S., Chemali R., Su S.M. Determining the invasion near the bit with the M.W.D. toroid sonde // SPWLA 27th Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 1986. – Paper SPWLA-1986-W. – 17 p.

Griffiths R., Barber T., Faivre O. Optimal evaluation of formation resistivities using array induction and array laterolog tools // SPWLA 41st Annual Logging Symposium. – Dallas, Texas, 2000. – Paper SPWLA-2000-BBB. – 13 p.

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

Karinski A., Mousatov A. Vertical resistivity estimation with toroidal antennas in transversely isotropic media // SPWLA 42nd Annual Logging Symposium (June 17–20, 2001). – Houston, Texas, USA, 2001. – Paper SPWLA-2001-BB. – 14 p.

Karinski A., Mousatov A. Feasibility of vertical resistivity determination by the LWD sonde with toroidal antennas for oil-base drilling fluid // SPWLA 43nd Annual Logging Symposium (June 2–5, 2002). – Oiso, Japan, 2002. – Paper SPWLA-2002-Q. – 13 p.

Kunz K.S., Moran J.H. Some effects of formation anisotropy on resistivity measurements in boreholes // Geophysics. – 1958. – Vol. 23 (4). – P. 770–794, doi: 10.1190/1.1438527.

Legendre E., Dubourg I., Doduy J., Smits J.W., Faivre O., Griffiths R. Better Saturation from New Array Laterolog // SPWLA 40th Annual Logging Symposium (May 30–June 3, 1999). – Oslo, Norway, 1999. – 14 p.

Li Q., Omeragic D., Chou L., Yang L., Duong K. New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling // SPWLA 46th Annual Logging Symposium (June 26–29, 2005). – New Orleans, Louisiana, 2005. – Paper SPWLA-2005-UU.

Lüling M.G. The paradox of anisotropy in electric logging: A simple proof and extensions to other physics domains // Geophysics. – 2013. – Vol. 78 (1). – P. W1–W8, doi: 10.1190/geo2012-0123.1

Maillet R., Doll H.G. Sur un theoreme relatif aux milieux electriquement anisotropes et ses applications it la prospection electrique en courant continue // ErgiinzungsheJte Jiir angewandte Geophysik. – 1932. – Vol. 3. – P. 109–124.

Moran H., Gianzero S. Electrical anisotropy: Its effect on well logs // Developments in geophysical exploration methods – 3 (The Developments series) / Edited by A.A. Fitch. – Applied Science Publishers, London & New York, 1982. – P. 195–238.

Redwine F. Formation resistivity measurement while drilling, utilizing physical conditions representative of the signals from a toroidal coil located adjacent the drilling bit: US Patent No. 3,408,561, October 29, 1968. – 13 p.

Schlumberger C., Schlumberger M., Leonardon E.G. Some observations concerning electrical measurements in anisotropic media and their interpretation // Trans. Am. Inst. Mining Engrs. – 1934. – Issue 110. – P. 159–182.

Tabanou J.R., Cheung P., Liu C.B., Hansen S., Lavigne J., Omeragic D., Pickens T., Borbas T., Wendt B. Thinly laminated reservoir evaluation in oilbase mud: high resolution versus bulk anisotropy measurement – a comprehensive evaluation // SPWLA 43th Annual Logging Symposium (2–5 June 2002). – Oiso, Japan, 2002. – Paper SPWLA-2002-P.

Tittman J. Formation anisotropy: reckoning with its effect // Oilfield Review. – 1990. – Vol. 2 (1). – P. 16–23.

Ulugergerli E.U. Two dimensional combined inversion of short- and long-normal dc resistivity well log data // Journal of Applied Geophysics. – 2011. – Vol. 73 (2). – P. 130–138, doi: 10.1016/j.jappgeo.2010.12.004.

Walstrom J.E. I. Introduction // Symposium on well bore surveys. 4th World Petroleum Congress (6–15 June, 1955). – Rome, Italy, 1955. – 120 p.

Wang G.L., Abubakar A., Allen D. Triaxial induction tool response in dipping and triaxially anisotropic formations // SEG International Exposition and Annual Meeting (14–19 October, 2018). – Anaheim, USA, 2018. – Paper SEG-2018-2997859, doi: 10.1190/segam2018-2997859.1.

Yang W. Determining resistivity anisotropy by joint lateral and induction logs // SPWLA 42nd Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 2001. – Paper SPWLA-2001-CC.

Zea H., Hagiwara T. Identifying and quantifying resistivity anisotropy in vertical boreholes // SPWLA 40th Annual Logging Symposium. – Oslo, Norway, 1999. – Paper SPWLA-1999-ZZ.

Zhang Zh., Yu L., Tabarovsky L.A., Kriegshauer B. Simultaneous determination of formation angles and anisotropic resistivity using multi-component induction logging data: United States Patent US 6,643,589 B2. Date of Patent: Nov. 4, 2003. – 10 p.

Zhou Z., Corley B., Khokhar R., Maurer H., Rabinovich M. A new multi laterolog tool with adaptive borehole correction // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (21–24 September, 2008). – Denver, USA, 2008. – SPE 114704. – 18 p.

REFERENCES

Alexandrov B.L. Abnormally high reservoir pressures in oil and gas bearing basins [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1987. – 216 p.

Alpin L.M. To the theory of electrical well logging [in Russian]. – Gostopizdat, Moscow-Leningrad, 1938. – 38 p.

Alpin L.M. Setochnoye modelirovaniye karotazha soprotivleniy // Prikladnaya Geofizika. – 1953. – No. 10. – P. 48–73.

Alpin L.M. Lateral logging pallets [in Russian]. – Gostoptekhizdat, Moscow, 1958. – 45 p.

Alpin L.M. Determination of the transverse resistivity of formations from measurements in the well // Izvestiya Vuzov. Geologiya i Razvedka. – 1978. – Vol. 4. – P. 81–95.

Anderson B., Barber T., Leveridge R., Bastia R., Saxena K.R., Tyagi A.K., Clavaud J.-B., Coffin B., Das M., Hayden R., Klimentos T., Minh C.C., Williams S. Triaxial induction – a new angle for an old measurement // Oilfield Review. – Vol. 20 (2). – P. 64–84.

Arps J.J. Inductive resistivity guard logging apparatus including toroidal coils mounted on a conductive stem: US Patent No. 3,305,771, February 21. – 1967. – 5 p.

Bała M. Evaluation of electric parameters of anisotropic sandy-shaly Miocene formations on the basis of resistivity logs // Acta Geophysica. – 2011. – Vol. 59 (5). – P. 954–966, doi: 10.2478/s11600-011-0033-1.

Bała M., Cichy A. Evaluating electrical anisotropy parameters in Miocene formations in the Cierpisz Deposit // Acta Geophysica. – 2015. – Vol. 63 (5). – P. 1296–1315, doi: 10.2478/s11600-014-0252-3.

Barber T., Anderson B., Abubakar A., Broussard T., Chen K.C., Davydycheva S., Druskin V., Habashy T., Homan D., Minerbo G., Rosthal R., Schlein R., Wang H. Determining formation resistivity anisotropy in the presence of invasion // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 26–29, 2004). – Houston, USA, 2004. – Paper SPE-90526-MS, doi: 10.2118/90526-MS.

Barber T.D. Method and system for indicating anisotropic resistivity in an earth formation: United States Patent US 7,027,967 B1. Date of Patent: Apr. 11, 2006. – 28 p.

Bedcher A.Z. Electrical anisotropy of clays and its geological significance // Trudy KF VNII [in Russian]. – Moscow, 1962. – Issue 10. – P. 235–241.

Bittar M.S. Electromagnetic wave resistivity tool having a tilted antenna for determining properties of earth formations. Patent US 7948238 B2. Publication date: May 24, 2011. – 20 p.

Bursian V.R. The theory of electromagnetic fields used in electrical prospecting [in Russian]. – Nedra, Leningrad, 1972. – 308 p.

Clark B., Bonner D., Jundt J., Luling M. Well logging apparatus having toroidal induction antenna for measuring, while drilling, resistivity of earth formations: US Patent No. 5,235,285, August 10, 1993. – 22 p.

Dakhnov V.N. Field geophysics. Production geophysics methods, apparatus and equipment, electrical methods for well survey [in Russian]. – Gosudarstvennoe Nauchno-Tekhnicheskoe Izdatel'stvo Neftyanoy i Gorno-Toplivnoy Literatury, Moscow, 1959. – 697 p.

Dakhnov V.N. On the influence of clay content on the value of electrical resistivity and porosity parameter of sandy reservoirs // Application of methods of field geophysics in the study of gas-bearing reservoirs. – Gostoptekhizdat, Moscow, 1962. – P. 81–96.

Dakhnov V.N. Electrical and magnetic methods of borehole survey: Textbook for universities [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1981. – 344 p.

Danilovskiy K.N., Petrov A.M., Leonenko A.R., Sukhorukova K.V. Capabilities of convolutional neural networks based algorithms for solving resistivity logging tasks // EAGE Conference Proceeding Data Science in Oil and Gas (Novosibirsk, August 4–6, 2021). – Novosibirsk, 2021. – P. 1–5, doi: 10.3997/2214-4609.202156039.

Dashevsky Yu.A., Epov M.I. Investigation of isotropic and anisotropic formations on direct and alternating current // Methods and results of complex geophysical studies of the earth's crust in Siberia [in Russian]. – IGiG SB RAS, Novosibirsk, 1981. – P. 131–137.

Dashevsky Yu.A., Tabarovsky L.A. Determination of the anisotropy coefficient by lateral logging arrays // Geology and Geophysics. – 1987. – No. 9. – P. 131–132.

Dashevsky Yu.A., Surodina I.V., Epov M.I. Quasi-three-dimensional mathematical modeling of diagrams of non-axisymmetric DC probes in anisotropic sections // Siberian Journal of Industrial Mathematics. – 2002. – Vol. 5, No. 3 (11). – P. 76–91.

Davydova O.P. Evaluating of deformations of clay rocks during the exploration of oil and gas fields according to well logging data and mathematical modeling: author. dis. ... cand. geol.-min. sciences [in Russian]. – RGGU Gubkina, Moscow, 2013. – 26 p.

Davydycheva S., Druskin V., Habashy T. An efficient finite-difference scheme for electromagnetic logging in 3D anisotropic inhomogeneous media // Geophysics. – 2003. – Vol. 68 (5). – P. 1525–1536, doi: 10.1190/1.1620626.

Davydycheva S., Frenkel M.A. Review of 3D EM modeling and interpretation methods for triaxial induction and propagation resistivity well logging tools // PIERS Proceedings (July 5–8, 2010). – Cambridge, USA, 2010. – P. 390–396.

Davydycheva S., Wang T. A fast modeling method to solve Maxwell's equations in 1D layered biaxial anisotropic medium // Geophysics. – 2011. – Vol. 76 (5). – P. 293–304, doi: 10.1190/geo2010-0280.1.

Druskin V.L. Development of methods for interpretation of lateral logging sounding in inhomogeneous axisymmetric media: dis. ... cand. physical-mat. sciences: 01.04.12 [in Russian]. – Moscow, 1984. – 121 p.

Eidman I.E. Induction well logging method: USSR Inventor's Certificate 272448, MKI G01V 3/04 / G01V 3/18. – 1970.

Eidman I.E. Types of sandy reservoirs of the Paleozoic of the Lower Volga region // Trudy NVNIIGG [in Russian]. – Saratov, 1966. – Issue 22. – 99 p.

Ellis D.V., Singer Ju.M. Well logging for Earth scientists. – Springer, Dordrecht, Netherlands, 2008. – 692 p.

Epov M.I., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N. Mathematical substantiation of a new electromagnetic tool with toroidal coils for high-resolution logging of oil and gas wells // Vestnik NSU. Series: Information Technologies. – 2018a. – Vol. 16 (1). – P. 113–129.

Epov M.I., Glinskikh V.N., Eremin V.N., Mikhaylov I.V., Nikitenko M.N., Osipov S.V., Petrov A.N., Surodina I.V., Yatsenko V.M. New electromagnetic tool for high-resolution logging: from theoretical substantiation to downhole testing // Neftyanoye Khozyaystvo. – 2018b. – No.11. – P. 23–27, doi: 10.24887/0028-2448-2018-11-23-27.

Epov M.I., Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V. Algorithms of data processing and inversion for an electromagnetic tool with toroidal coils when studying macroanisotropic properties of reservoirs // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2019. – Vol. 330 (6). – P. 187–197.

Faivre O., Barber T., Jammes L., Vuhoang D. Using array induction and array laterolog data to characterize resistivity anisotropy in vertical wells // SPWLA 43th Annual Logging Symposium (June 2–5, 2002). – Oiso, Japan. – 2002. – SPWLA-2002-M. – 12 p.

FMI – Fullbore formation microimager. URL: https://www.slb.com/reservoir-characterization/surface-and-downhole-logging/wireline-openhole-logging/fmi-fullbore-formation-microimager.

Fock V.A. The theory of determining the resistivity of rocks by the method of logging [in Russian]. – Tekhteoretizdat, Leningrad, 1933. – 60 p.

Frenkel M.A., Zhou Z. Improved Estimation of Hydrocarbon Reserves Using High-Definition Lateral Log Array Data in Vertical and Highly Deviated Wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (1–4 October 2000). – Dallas, Texas, 2000. – P. 99–112.

Frenkel M.A., Geldmacher I.M. Real-time Estimation of Resistivity Anisotropy Using Array Lateral and Induction Logs // Offshore Technology Conference (5–8 May 2003). – Houston, Texas, 2003. – Paper OTC-15125-MS.

Frenkel M.A., Geldmacher I.M. Method for resistivity anisotropy determination in near vertical wells: United States Patent US 2004/0133351 A1. Pub. Date: Jul. 8, 2004. – 15 p.

Gaillot Ph., Brewer T., Pezard Ph., Yeh En-C. Borehole Imaging Tools – Principles and Applications // Scientific Drilling. – 2007. – Vol. 5 (5). – P. 1–4.

Georgi D.T., Schoen J.H., Rabinovich M. Biaxial Anisotropy: Its Occurrence and Measurement with Multicomponent Induction Tools // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 21–24, 2008). – Denver, USA, 2008. – Paper SPE-114739-MS, doi: 10.2118/114739-MS.

Gianzero S., Bittar M. Method and apparatus using one or more toroids to measure electrical anisotropy: US Patent No. 7,227,363, June 5, 2007. – 20 p.

Gianzero S., Chemali R., Su S.M. Determining the invasion near the bit with the M.W.D. toroid sonde // SPWLA 27th Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 1986. – Paper SPWLA-1986-W. – 17 p.

Griffiths R., Barber T., Faivre O. Optimal evaluation of formation resistivities using array induction and array laterolog tools // SPWLA 41st Annual Logging Symposium. – Dallas, Texas, 2000. – Paper SPWLA-2000-BBB. – 13 p.

Grishkevich V.F. Macrostructure of the Berriasian-Aptian deposits of Western Siberia and its use in the construction of information technologies in the geology of oil and gas [in Russian]. – IzdatNaukaServis, Tyumen, 2005. – 116 p.

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

Karinski A., Mousatov A. Vertical resistivity estimation with toroidal antennas in transversely isotropic media // SPWLA 42nd Annual Logging Symposium (June 17–20, 2001). – Houston, Texas, USA, 2001. – Paper SPWLA-2001-BB. – 14 p.

Karinski A., Mousatov A. Feasibility of vertical resistivity determination by the LWD sonde with toroidal antennas for oil-base drilling fluid // SPWLA 43nd Annual Logging Symposium (June 2–5, 2002). – Oiso, Japan, 2002. – Paper SPWLA-2002-Q. – 13 p.

Karinsky A.D. Electromagnetic field in axisymmetric models of macroanisotropic and microanisotropic media // Geofizika. – 2006. – No. 6. – P. 23–28.

Karinsky A.D. Induced charges within microand macroanisotropic media and their influence on the electric field of tapped anisotropic beds // Geofizika. – 2010. – No. 2. – P. 37–48.

Karinsky A.D. Electromagnetic field in models of an electrically anisotropic medium [in Russian]. – GEOS, Moscow, 2018. – 184 p.

Karinsky A.D., Daev D.S. The results of 2D modeling for electromagnetic logging and resistivity logging probes in the case of variable thickness of beds in macroanisotropic layers // Geofizika. – 2011. – No. 3. – P. 32–42.

Kashik A. S, Makarova M.K. Anisotropy of rocks by their electrical resistivity // Izvestiya Vuzov. Geologiya i Razvedka. – 1970. – No. 7. – P. 107–110.

Kaurkin M.D. Laboratory modeling of dipole resistivity logging probes and electromagnetic logging probes with toroidal antennas: dis. ... cand. tech. Sciences: 25.00.10 [in Russian]. – RGGU, Moscow, 2015. – 138 p.

Kneller L.E., Potapov A.P. Reservoir rock resistivity studies while lateral and vertical heterogeneity // Geofizika. – 2010. – No. 1. – P. 52–64.

Knizhnerman L.A., Khusid M.D., Dyakonova T.F. Application of the consecutive lateral correction method to the solution of the axisymmetric inverse problem of electrical and induction logging in geological areas with diagonally-anisotropic beds // Geofizika. – 2017. – No. S. – P. 118–125.

Komarov S.G. Resistivity logging. Interpretation [in Russian]. – Gosudarstvennoe Nauchno-Tekhnicheskoe Izdatel'stvo Neftyanoy i Gorno-Toplivnoy Literatury, Leningrad, 1950. – 229 p.

Komarov S.G. Geophysical well survey methods [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1973. – 368 p.

Krasnoselskikh A.A. Physical modeling of an electromagnetic logging probe designed to determine the coefficient of electrical anisotropy of rocks: dis. ... Cand. physical-math. Sciences: 25.00.10 [in Russian]. – RGGU, Moscow, 2016. – 112 p.

Kulinkovich A.E. Logging electric integrator EKSM // Applied Geophysics. – 1962. – No. 34. – P. 219–232.

Kunz K.S., Moran J.H. Some effects of formation anisotropy on resistivity measurements in boreholes // Geophysics. – 1958. – Vol. 23 (4). – P. 770–794, doi: 10.1190/1.1438527.

Legendre E., Dubourg I., Doduy J., Smits J.W., Faivre O., Griffiths R. Better Saturation from New Array Laterolog // SPWLA 40th Annual Logging Symposium (May 30–June 3, 1999). – Oslo, Norway, 1999. – 14 p.

Li Q., Omeragic D., Chou L., Yang L., Duong K. New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling // SPWLA 46th Annual Logging Symposium (June 26–29, 2005). – New Orleans, Louisiana, 2005. – Paper SPWLA-2005-UU.

Lüling M.G. The paradox of anisotropy in electric logging: A simple proof and extensions to other physics domains // Geophysics. – 2013. – Vol. 78 (1). – P. W1–W8, doi: 10.1190/geo2012-0123.1

Maillet R., Doll H.G. Sur un theoreme relatif aux milieux electriquement anisotropes et ses applications it la prospection electrique en courant continue // ErgiinzungsheJte Jiir angewandte Geophysik. – 1932. – Vol. 3. – P. 109–124.

Moran H., Gianzero S. Electrical anisotropy: Its effect on well logs // Developments in geophysical exploration methods – 3 (The Developments series) / Edited by A.A. Fitch. – Applied Science Publishers, London & New York, 1982. – P. 195–238.

Mikhaylov I.V., Velesov D.V., Glinskikh V.N. Study of thin layered reservoirs with toroidal sources and receivers (on the example of the Priobskoe Oil Field) // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2020. – No. 1. – P. 16–27.

Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N. Application of toroidal coils in oil and gas well logging problems (analytical review) // Geophysical Research. – 2021. – Vol. 22 (1). – P. 5–24.

Nesterenko Yu.M., Glyantsev A.V. Micro-fracturing of the rocks of the seals of oil and gas fields and the crossflow of water through them in the Southern Pre-Urals // Gornoe Echo. Bulletin of the Mining Institute. – 2005. – No. 2. – P.32–34.

Nikolaeva E.V. Features of the geological structure of productive objects of layers YuS2 and AS4-12 of the Surgut region in connection with their exploration and supplementary exploration: author. dis .... cand. geol.-min. sciences [in Russian]. – Novosibirsk, 1993. – 17 p.

Osipov V.I., Sokolov V.N., Rumyantseva N.A. Microstructure of clay rocks [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1989. – 211 p.

Osipov V.I., Sokolov V.N., Eremeev V.V. Clay caps of oil and gas fields [in Russian]. – Nauka, Moscow, 2001. – 238 p.

Pirson S.J. Handbook of well log analysis: For oil and gas formation evaluation. – Prentice-Hall, 1963. – 326 p.

Pirson S.J. Oil Reservoir Engineering. – Verlag, New York, Toronto, London, 1958. – 735 p.

Prozorovich G.E. Oil and Gas Seales // Trudy ZapSibNIGNI [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1972. – Issue 49. – 119 p.

Redwine F. Formation resistivity measurement while drilling, utilizing physical conditions representative of the signals from a toroidal coil located adjacent the drilling bit: US Patent No. 3,408,561, October 29, 1968. – 13 p.

Schlumberger C., Schlumberger M., Leonardon E.G. Some observations concerning electrical measurements in anisotropic media and their interpretation // Trans. Am. Inst. Mining Engrs. – 1934. – Issue 110. – P. 159–182.

Sidorchuk A.I. Electric logging in an anisotropic medium with an inhomogeneous penetration zone // Izvestiya AN SSSR. Phys. Zemli. – 1971. – No. 6. – P. 41–47.

Sidorchuk A.I. Influence of the structural features of rocks on the curves of lateral electrical sounding // Trudy MINH and GP. – 1975. – Issue 115. – P. 232–238.

Snegirev A.M., Veliky S.A. On the experimental determination of the "true" transverse resistance of rocks in dry wells // Izvestiya Vuzov. Geologiya i Razvedka. – 1982. – No. 9. – P. 157–159.

Sokolov V.N. Microcosm of clay rocks // Soros Educational Journal. – 1996. – No. 3. – P. 56–64.

Sokolov V.N. Clay rocks and their properties // Soros Educational Journal. – 2000. – No. 9. – P. 59–65.

Surodina I.V., Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N. Mathematical modeling of toroidal source signals in three-dimensional isotropic earth models // Natural and Technical Sciences. – 2020. – No. 12. – P. 131–134.

Tabanou J.R., Cheung P., Liu C.B., Hansen S., Lavigne J., Omeragic D., Pickens T., Borbas T., Wendt B. Thinly laminated reservoir evaluation in oilbase mud: high resolution versus bulk anisotropy measurement – a comprehensive evaluation // SPWLA 43th Annual Logging Symposium (2–5 June 2002). – Oiso, Japan, 2002. – Paper SPWLA-2002-P.

Tabarovskiy L.A., Dashevskiy Yu.A. Solution of the problem of lateral logging in inclined wells by the method of integral equations // Soviet Geology and Geophysics. – 1976. – No. 7. – P. 70–79.

Tabarovskiy L.A., Dashevskiy Yu.A. Lateral logging sounding in inclined wells // Elektromagnitnyye metody issledovaniya skvazhin [in Russian]. – Nauka, Novosibirsk, 1979a. – P. 67–129.

Tabarovskiy L.A., Dashevskiy Yu.A. Magnetoelectric logging // Soviet Geology and Geophysics. – 1979b. – No. 4. – P. 94–105.

Tabarovskiy L.A., Dashevskiy Yu.A. Sposob elektricheskogo karotazha: Avtorskoye svidetel'stvo №693314 (SSSR) // Byull. Izobreteniy. – № 39. – 1979c. – 4 p.

Tittman J. Formation anisotropy: reckoning with its effect // Oilfield Review. – 1990. – Vol. 2 (1). – P. 16–23.

Yang W. Determining resistivity anisotropy by joint lateral and induction logs // SPWLA 42nd Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 2001. – Paper SPWLA-2001-CC.

Turkischer R.I. Electric logging in anisotropic environment // Izvestiya AN SSSR. Geographical and Geophysical Series. – 1945. – Vol. 9 (3). – P. 279–287.

Ulugergerli E.U. Two dimensional combined inversion of short- and long-normal dc resistivity well log data // Journal of Applied Geophysics. – 2011. – Vol. 73 (2). – P. 130–138, doi: 10.1016/j.jappgeo.2010.12.004.

Vikulova M.F., Burkov Yu.K., Makedonov A.V., Tikhomirova N.Ya., Osipova A.I., Feofilova A.P., Kulakova G.V., Zemova N.N. Facial types of clay rocks (and their primary lithological features) [in Russian]. – Nedra, Leningrad, 1973. – 288 p.

Walstrom J.E. I. Introduction // Symposium on well bore surveys. 4th World Petroleum Congress (6–15 June, 1955). – Rome, Italy, 1955. – 120 p.

Wang G.L., Abubakar A., Allen D. Triaxial induction tool response in dipping and triaxially anisotropic formations // SEG International Exposition and Annual Meeting (14–19 October, 2018). – Anaheim, USA, 2018. – Paper SEG-2018-2997859, doi: 10.1190/segam2018-2997859.1.

Yang W. Determining resistivity anisotropy by joint lateral and induction logs // SPWLA 42nd Annual Logging Symposium. – Houston, Texas, 2001. – Paper SPWLA-2001-CC.

Zaikovsky N.Ya., Kovalenko D.E., Kulinkovich A.E. Determination of the parameters of the anisotropic formation from the BKZ curves // Prikladnaya Geofizika. – 1965. – No. 46. – P. 213–217.

Zea H., Hagiwara T. Identifying and quantifying resistivity anisotropy in vertical boreholes // SPWLA 40th Annual Logging Symposium. – Oslo, Norway, 1999. – Paper SPWLA-1999-ZZ. – 11 p.

Zhang Zh., Yu L., Tabarovsky L.A., Kriegshauer B. Simultaneous determination of formation angles and anisotropic resistivity using multi-component induction logging data: United States Patent US 6,643,589 B2. Date of Patent: Nov. 4, 2003. – 10 p.

Zhou Z., Corley B., Khokhar R., Maurer H., Rabinovich M. A new multi laterolog tool with adaptive borehole correction // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (21–24 September, 2008). – Denver, USA, 2008. – SPE 114704. – 18 p.

Zhuravlev V.P. Determination of the resistivity of anisotropic formations // Prikladnaya Geofizika. – 1968. – No. 51. – P. 170–186.

Zhuravlev V.P. Resistance curves of an anisotropic formation of finite thickness // Prikladnaya Geofizika. – 1971. – No. 64. – P. 194–197.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

СУХОРУКОВА Карина Владимировна – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: количественная интерпретация комплекса данных скважинной электрометрии в вертикальных и субгоризонтальных скважинах.

ПЕТРОВ Алексей Михайлович – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: количественная интерпретация данных зондирующих методов скважинной электрометрии.

Статья поступила в редакцию 6 октября 2021 г.,
принята к публикации 10 ноября 2021 г.