

**MODERN ALGORITHMS AND SOFTWARE FOR INTERPRETATION OF RESISTIVITY LOGGING DATA**

M.I. Epov , V.N. Glinskikh , M.N. Nikitenko , A.A. Lapkovskaya , A.R. Leonenko ,  
A.M. Petrov , K.V. Sukhorukova , D.I. Gornostalev 

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

**ABSTRACT.** The electrodynamics of geological media investigates the interrelations of resistivity logging signals and properties of fluid-containing rocks and creates innovative well logging technologies. Its development is inextricably linked with modern techniques for mathematical modeling and quantitative interpretation of high-precision data. In order to increase the information content of galvanic and electromagnetic logging, we have developed algorithms and software for numerical simulation and inversion of field data. In our study of the Cretaceous and Jurassic deposits of West Siberia, a quantitative interpretation of high-frequency electromagnetic and lateral logging signals was carried out. To create geoelectric models, we interpreted the field resistivity logging data by an unconventional quantitative technique based on their joint numerical inversion and estimations of the vertical resistivity of permeable deposits. Another line of our research was aimed at a scientific substantiation of a new technology for mapping and spatial tracking of lateral heterogeneities and oil-promising zones in the Bazhenov formation. The aim was achieved by using the TEM sounding data on a spatially distributed system of directional and horizontal wells.

**KEYWORDS:** lateral logging sounding; electromagnetic logging sounding; pulsed electromagnetic sounding; numerical inversion; oil-saturated reservoir; Bazhenov formation

**FUNDING:** The study aimed to substantiate the possibility of electromagnetic sounding by the method of transient electromechanical processes was financially supported by the Russian Science Foundation (project 19–77–20130 – Fundamentals of pulsed electromagnetic sounding with a controlled spectrum: theoretical substantiation of an innovative geophysical exploration method using high-performance computing based on the Siberian Supercomputer Center of SB RAS).

**RESEARCH ARTICLE**

Received: April 20, 2021

Revised: July 23, 2021

Accepted: August 12, 2021

**Correspondence:** Mikhail I. Epov, [epovmi@mail.ru](mailto:epovmi@mail.ru)

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

## СОВРЕМЕННОЕ ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОМПЛЕКСА ДАННЫХ СКВАЖИННОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

М.И. Эпов, В.Н. Глинских, М.Н. Никитенко, А.А. Лапковская, А.Р. Леоненко,  
А.М. Петров, К.В. Сухорукова, Д.И. Горносталев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Развитие электродинамики геологических сред для изучения связей сигналов скважинной электрометрии со свойствами флюидосодержащих пород и создания инновационных технологий геофизических исследований в скважинах неразрывно связано с современными методами математического моделирования и количественной интерпретации высокоточных данных. С целью повышения информативности применяемых на практике методов гальванического и электромагнитного каротажа разработано программно-алгоритмическое обеспечение численного моделирования и инверсии практических данных. Для меловых и юрских отложений Западной Сибири проведена количественная интерпретация сигналов высокочастотного электромагнитного и бокового каротажных зондирований. Для построения геоэлектрических моделей применена оригинальная методика количественной интерпретации практических данных электрокаротажа на основе их совместной численной инверсии с оценкой вертикального УЭС проницаемых отложений. Проведены исследования, направленные на научное обоснование новой технологии картирования и пространственной локализации латеральных неоднородностей и нефтеперспективных зон в баженовской свите с использованием пространственно-распределенной системы наклонно-горизонтальных скважин на основе импульсных электромагнитных зондирований методом переходных процессов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** боковое каротажное зондирование; электромагнитное каротажное зондирование; импульсное электромагнитное зондирование; численная инверсия; нефтенасыщенные коллекторы; баженовская свита

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Научно-исследовательские работы по обоснованию возможности электромагнитных зондирований методом переходных процессов выполнены при финансовой поддержке РФФ (проект № 19-77-20130 «Фундаментальные основы импульсного электромагнитного зондирования с управляемым спектром: теоретическое обоснование инновационного геофизического метода геологоразведки с использованием высокопроизводительных вычислений на базе Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН»).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие электродинамики геологических сред с целью выявления связей сигналов электрических и электромагнитных зондирований со свойствами флюидосодержащих горных пород базируется на современных методах математического моделирования и создании новых высокоэффективных технологий исследований в нефтегазовых скважинах. Такие исследования включают разработку, тестирование, модификацию алгоритмов и программ численного моделирования и инверсии данных электрических и электромагнитных зондирований в нефтегазовых скважинах, в том числе на основе решений соответствующих задач в полных математических постановках и высокопроизводительных параллельных вычислениях на многопроцессорных устройствах. С их помощью изучаются электрофизические характеристики геологических сред и разрабатываются эффективные подходы и способы количественной интерпретации комплекса электрометрии в нефтегазовых скважинах сложной траектории, в том числе с учетом влияния анизотропии удельной электропроводности и частотной дисперсии диэлектрической проницаемости.

Электрические свойства терригенных коллекторов определяются по данным электрокаротажа на постоянном и/или переменном токе. Погрешность определения по комплексу сигналов зондов разной глубинности мала при большой толщине и однородности коллектора, но быстро возрастает с уменьшением толщины и усилением контраста между электропроводностью коллектора и вмещающими его породами. Увеличить точность оценки электрических параметров коллектора, а соответственно, и нефтесодержания можно путем выбора более адекватной строению разреза 2D-модели, учитывающей влияние нескольких пластов, скважины с буровым раствором и измененных прискважинных зон на сигналы в точке измерения. Поэтому для тонкослоистых разрезов разрабатываются средства двумерного моделирования и инверсии сигналов электрокаротажа, например [Kneller, Potapov, 2010; Ulugergerli, 2011; Knizhnerman et al., 2017]. Однако применение реализующих двумерный подход программных средств затрудняется их значительной ресурсоемкостью и недостаточностью методических разработок, поэтому актуальны оптимизация алгоритмов и исследование возможности инверсии как на синтетических сигналах,

так и на практических данных [Surodina, Nesterova, 2015; Nechaev, Glinskikh, 2017; Petrov et al., 2019].

Последние десятилетия повышается интерес к изучению баженовской свиты. Ее состав – смесь битуминозных силицитных, карбонатных и аргиллитных составляющих – определяет ее значимость на территории Западной Сибири: это и основной региональный флюидопор, и нефтегенерирующая и нефтеносная толща, что доказано многолетней добычей нефти [Vyshemirsky, 1986; Gurari, 1961; Kontorovich et al., 1971]. Вследствие этого одной из задач при изучении свиты является пространственная локализация перспективных для нефтедобычи зон. Существующие на сегодняшний день технологии геофизического исследования высокоомных битуминозных отложений недостаточно эффективны, и здесь перспективными могут оказаться импульсные электромагнитные зондирования в наклонно-горизонтальных скважинах.

Наклонно-направленное бурение на территории Западной Сибири широко используется для повышения нефтеотдачи как меловых, так и юрских коллекторов, в том числе расположенных на небольшом расстоянии от границ баженовской свиты. Дистанционное зондирование из сильнонаклонных и субгоризонтальных скважин, пробуренных в таких пластах, возможно, может быть информативным при изучении свиты. Кроме того, представляются перспективными межскважинные зондирования, при которых генераторы и приемники электромагнитного поля располагаются в системе скважин, вскрывающих верхнеюрские и нижнемеловые коллекторы. Нами созданы вычислительные алгоритмы и разработано программное обеспечение для математического моделирования сигналов импульсных электромагнитных зондирований в реалистичных геоэлектрических моделях баженовской свиты с реальными траекториями горизонтальных скважин [Eпов et al., 2019]. Геоэлектрические модели разреза построены по результатам обработки и интерпретации практических данных электрокаротажа современного скважинного геофизического комплекса «СКЛ» [Kayurov et al., 2015]. Здесь задача состоит в обосновании возможности электромагнитных зондирований методом переходных процессов для картирования и локализации нефтеперспективных зон в баженовской свите.

В настоящей работе рассматривается современное программно-методическое обеспечение обработки данных скважинной электрометрии с описанием основных особенностей вычислительных программ и интерпретационных методик, сопровождающимся практически примерами.

## 2. ЧИСЛЕННАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА

Применение новых типов буровых растворов и технологий бурения, снижение репрессии бурового раствора на пласт и повышение интереса к коллекторам с невысокими фильтрационно-емкостными свойствами приводят к тому, что перестает быть ярко выраженным

привычный признак проницаемости пород, а именно наличие радиального изменения удельного электрического сопротивления (УЭС), отражающееся в сигналах электрического и электромагнитного каротажа [Eпов et al., 2002; Kashevarov et al., 2003]. Определение радиального распределения УЭС в таких условиях становится возможным по комплексу данных гальванического и индукционного каротажей. Для меловых и юрских отложений Западной Сибири проводится количественная интерпретация данных высокочастотного электромагнитного и бокового каротажных зондирований. Для построения геоэлектрических моделей применяется оригинальная методика количественной интерпретации данных бокового каротажного зондирования (БКЗ) и высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования (ВЭМКЗ, ВИКИЗ) на основе совместной численной инверсии практических данных с оценкой вертикального УЭС проницаемых отложений.

### 2.1. Программное обеспечение и методики интерпретации

Методика количественной интерпретации данных БКЗ и ВЭМКЗ (ВИКИЗ), измеренных в вертикальных скважинах, основана на численной инверсии сигналов зондов в параметры двумерной осесимметричной среды. Программное обеспечение инверсии базируется на конечно-элементных алгоритмах моделирования сигналов гальванических и индукционных зондов [Eпов et al., 2020].

Базовая геоэлектрическая модель – это двумерная осесимметричная трансверсально-изотропная электропроводящая среда, в которой однородные участки разделены цилиндрическими и горизонтальными границами, а каротажный прибор располагается на оси скважины [Petrov et al., 2018]. Модель среды описывается произвольным количеством слоев и радиальных зон с возможностью учета изменений диаметра скважины и вытеснения бурового раствора корпусом прибора. Электрофизические свойства каждого блока считаются постоянными и описываются вертикальным и горизонтальным УЭС и диэлектрической проницаемостью.

Для решения вариационных постановок прямых задач, получаемых в результате преобразований уравнений Максвелла, используется метод конечных элементов [Shaidurov, 1989], а затем разложение Холецкого для решения результирующей системы линейных алгебраических уравнений. Алгоритмы программно реализованы О.В. Нечаевым (ИНГГ СО РАН), верифицированы сравнением с другими алгоритмами моделирования, разработанными в Институте, и протестированы на большом количестве реалистичных геоэлектрических моделей осадочных отложений Западной Сибири [Petrov et al., 2018]. Установлено, что алгоритмы обеспечивают высокую производительность вычислений и точность расчета. Возможность многопоточных вычислений, учета диэлектрической проницаемости и

гибкие настройки параметров моделирования позволяют использовать их как надежную основу для алгоритмов инверсии. Обратная задача определения параметров модели окоскважинного пространства формулируется как задача минимизации функционала невязки, представляющего собой среднеквадратическое отклонение синтетических данных от экспериментальных. В программном комплексе поддерживается инверсия произвольного набора зондов БКЗ и ВИКИЗ/ВЭМКЗ как по отдельности, так и совместно.

Отсутствие в методе БКЗ фокусировки тока осложняет двумерную инверсию сигналов. Асимметричные трехэлектродные градиент-зонды дают очень сложную форму сигналов при пересечении горизонтальных границ, а сигналы зависят от свойств разреза на значительном расстоянии от точки измерения. Из-за этого функционал невязки характеризуется большим числом локальных минимумов в моделях, соответствующих по сложности реальной среде. В таких условиях простой направленный перебор параметров часто не способен привести к удовлетворительному результату обратной задачи. Для решения этой проблемы предлагается два метода оптимизации: модифицированный покоординатный спуск [Nechaev, Glinskikh, 2017] и минимизация методом наименьших квадратов без использования производных [Cartis et al., 2018].

Реализованы четыре различных режима оконной работы инверсии, ускоряющие работу с большими моделями, и гибкая система ограничений на модельные параметры, позволяющая учитывать априорную информацию о разрезе и управлять процессом инверсии. Перечисленные особенности алгоритмов и разработанные методические приемы подготовки стартовой модели и выбора варьируемых параметров обеспечивают восстановление пространственного распределения УЭС по данным БКЗ и ВИКИЗ даже на интервалах сложного переслаивания относительно тонких пластов. Следует отметить, что с развитием методики интерпретации программы постоянно модифицируются под возрастающие требования: увеличивается быстродействие прямых задач, совершенствуется система ограничений на параметры модели, добавляются новые режимы работы алгоритмов оптимизации.

## 2.2. Примеры интерпретации

**Геоэлектрические модели меловых отложений.** Изменение УЭС пористой проницаемой породы от стенки скважины вглубь пласта – радиальный профиль УЭС – формируется в результате фильтрации бурового раствора в коллектор при бурении и после него и сдвига исходных пластовых флюидов от скважины. Ближняя к скважине цилиндрическая область коллектора характеризуется высоким значением УЭС, потому что она заполнена пресным фильтратом бурового раствора; далее при исходном нефтеводном насыщении может формироваться область с низким УЭС – эта область заполнена минерализованной пластовой водой; при дальнейшем удалении от скважины находится

неизменная часть коллектора, УЭС которой определяется содержанием пластовой воды и ее минерализацией. Радиальный профиль УЭС может быть как монотонным – при насыщении только водой или только нефтью, так и более сложным – при смешанном насыщении. Поскольку область формирования сигнала зондов разной длины или длины и частоты охватывает разные части этого профиля, то по соотношению сигналов можно оценить содержание нефти и пластовой воды в коллекторе. Характер соотношения сигналов разных зондов ярко выражен при бурении на водно-глинистом растворе и при превышении давления раствора в скважине над давлением пластовых флюидов.

Изменение состава буровых растворов и технологий бурения (полимерные слабофильтрующиеся растворы, бурение на равновесии), проведение каротажа во время бурения, а также необходимость исследования коллекторов с невысокими фильтрационно-емкостными свойствами приводят к тому, что радиальное изменение УЭС перестает быть ярко выраженным в сигналах электрического и электромагнитного каротажа. Изменение породы в результате фильтрации оказывается настолько неглубоким, что не влияет на сигналы некоторых зондов. В этом случае логично для построения геоэлектрической модели коллектора использовать данные всех зондов электрокаротажа, записанные на исследуемом интервале. Это означает осуществить совместную инверсию сигналов зондов разной глубинности и разрешающей способности, работающих на разных принципах генерации и измерения электромагнитного поля. Итог такой инверсии – выявление особенностей радиального профиля УЭС, незаметных в исходных сигналах.

В связи с выработанностью ресурсов мощных нефтенасыщенных коллекторов добывающие компании начинают обращать внимание на коллекторы, ранее не представлявшие экономического интереса, т.е. небольшой мощности и смешанного насыщения, с невысоким нефтесодержанием. Небольшая толщина таких коллекторов и УЭС, близкое к УЭС вмещающих отложений, приводят к тому, что для определения их параметров необходимо подбирать геоэлектрическую модель с учетом толщин пластов, т.е. с применением численной инверсии в классе двумерных моделей. Поскольку интересно выявить такие коллекторы в уже работающих, т.е. обсаженных, скважинах, инверсии подвергаются данные архивного каротажа.

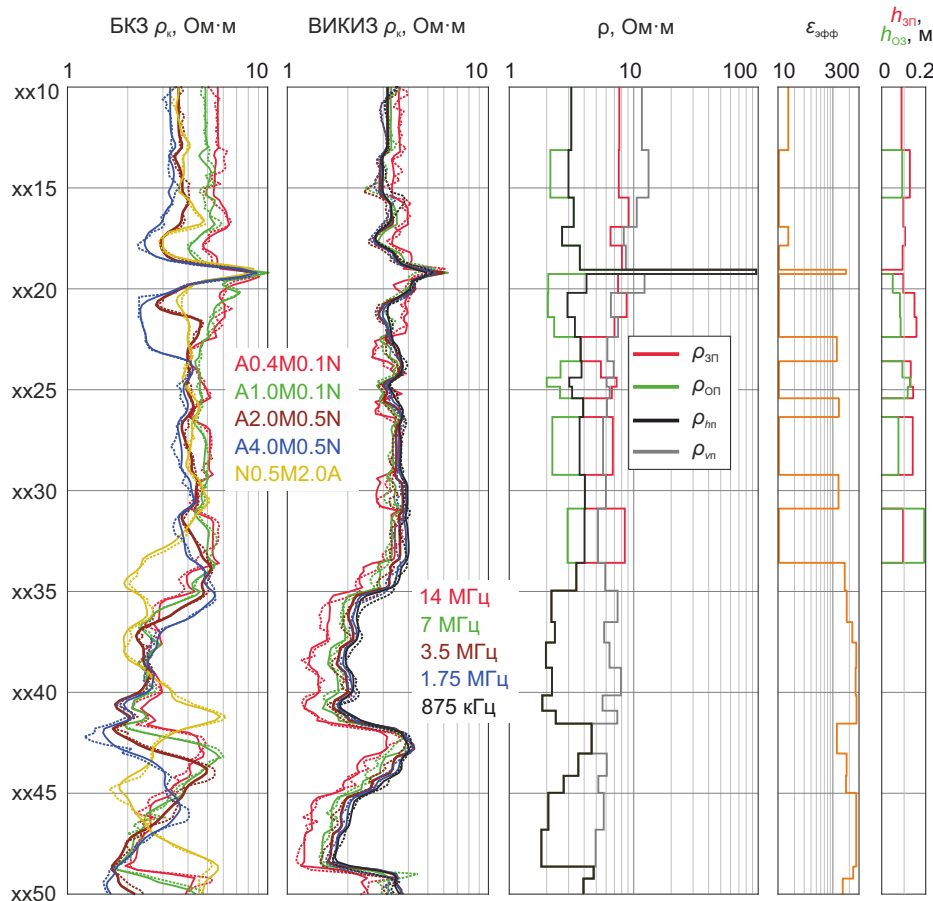
В типичном меловом разрезе месторождений Широтного Приобья при минерализации пластовых вод 20–30 г/л значение УЭС коллекторов с примерно одинаковым содержанием пластовой воды составляет от 4 до 6 Ом·м, непроницаемых глинистых пластов – от 2 до 6 Ом·м. Очевидно, что разделение песчаных коллекторов и непроницаемых глинистых пластов в этих условиях становится затруднительным. Один из возможных признаков смешанного насыщения – формирование в коллекторе зоны скопления минерализованной пластовой воды (окаймляющей зоны (ОЗ)) между

неизменной частью пласта и зоной проникновения, заполненной пресным фильтратом бурового раствора. Как правило, наличие в коллекторе ОЗ приводит к характерному соотношению сигналов ВИКИЗ: зонды малой и большой длины показывают большее кажущееся УЭС, чем зонды средней длины (вогнутая кривая зондирования) [Antonov et al., 2012; Sukhorukova et al., 2020]. Однако при небольшом времени между бурением и каротажем ОЗ расположена слишком близко к стенке скважины, чтобы проявляться в форме кривой зондирования метода ВИКИЗ, а гальванические зонды БК и БКЗ к ней не чувствительны, поэтому визуальный анализ каротажных диаграмм оказывается нерезультативным.

Пример такого интервала приведен на рис. 1. По данным БКЗ и ВИКИЗ, видны пласты с зоной проникновения в верхней части интервала (хх10-хх22 м, по признаку наибольших значений для коротких зондов, обозначенных красным цветом), однако, по данным других геофизических методов, ниже есть и другие песчаные интервалы, в которых этот признак отсутствует.

При этом даже в верхней части не заметно влияния окаймляющей зоны на сигналы ВИКИЗ. Отметим, что в глинистых пластах короткий зонд ВИКИЗ показывает меньшие значения сопротивления, чем остальные зонды, что объясняется влиянием поляризационных эффектов на частотах генерации электромагнитного поля (0.875, 1.75, 3.5, 7 и 14 МГц), наибольшим на высокой частоте.

В результате численной инверсии сигналов БКЗ и ВИКИЗ определяются электрофизические параметры пластов и уточняется положение их горизонтальных границ, а также оценивается радиальное распределение УЭС. Во всех проницаемых пластах выявляется окаймляющая зона, которая формируется при наличии в пласте подвижной нефти. Поэтому эти отложения представляют интерес для дальнейшей разработки. Толщина зон проникновения и окаймляющих зон определяется очень небольшой (по 0.1–0.2 м), УЭС ОЗ около 2 Ом·м близко к значению УЭС водонасыщенных пластов. В глинистых пластах определяется большое значение относительной диэлектрической



**Рис. 1.** Результат совместной 2D-инверсии данных БКЗ и ВИКИЗ, измеренных в меловых отложениях Широного Приобья. Слева направо: сигналы БКЗ, сигналы ВИКИЗ, УЭС пластов и измененных зон, относительная диэлектрическая проницаемость, толщины измененных зон. Сплошными линиями показаны рассчитанные сигналы, пунктирными – измеренные.

**Fig. 1.** Joint 2D inversion of the lateral logging sounding (LLS) and VIKIZ (high-frequency induction logging with isoparametric sounding) data on the Cretaceous deposits in Shirotnoe Priobie, the area of the Ob River.

From left to right: LLS signals, VIKIZ signals, resistivity values of formations and altered zones, relative dielectric permittivity, thicknesses of the altered zones. Lines show signals: solid – estimations from simulation, dashed – field measurements.

проницаемости. Для всех отложений интервала характерна также электрическая анизотропия, минимальная в нижних песчаных пластах и увеличивающаяся к верхним, максимальная – в глинистых пластах. Изменение соотношения УЭС в горизонтальном и вертикальном направлениях связано с изменением условий осадконакопления: нижние пласты с маленькой разницей значений УЭС сложены более изометричными зернами, чем верхние.

**Геоэлектрические модели юрских отложений.** Количественная интерпретация сигналов БКЗ и ВИКИЗ в юрских отложениях Западной Сибири осложнена рядом особенностей: большим контрастом электрических свойств, частым чередованием низкоомных глинистых и высокоомных карбонатных пластов небольшой толщины, наличием анизотропии (УЭС в плоскости слоистости меньше, чем в перпендикулярном направлении), повышенной глинистостью пластов-коллекторов и рассеянной пиритизацией. Возможности применения разработанных программ и подходов при интерпретации для получения геоэлектрических параметров модели, соответствующей по сложности юрским отложениям, исследовались на интервале нефтенасыщенного коллектора Ю<sub>2</sub> Восточно-Сургутского месторождения.

Построить геоэлектрическую модель с одной измененной зоной (зона проникновения фильтрата бурового раствора) в проницаемых интервалах, согласованную по сигналам БКЗ и ВИКИЗ, оказалось невозможным. В результате усложнения итоговым вариантом стала модель с дополнительной прискважинной зоной с повышенным значением УЭС, предположительно связанной с уплотнением в результате бурения глубоководного коллектора. Ее строение согласуется с результатами гидродинамического моделирования процесса фильтрации бурового раствора в пласт [Nazarova et al., 2013; Yeltsov et al., 2012, 2014]. Кроме того, выявляется частотная дисперсия электрических свойств, которая учитывается как разные значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon(\omega)$  на частотах зондов ВИКИЗ (0.875, 1.75, 3.5, 7 и 14 МГц).

В итоговой модели юрских отложений (рис. 2) стоит отметить сложное строение прискважинной зоны (отдаленная от стенки скважины зона повышенного УЭС) в верхней части коллектора, что не противоречит гидродинамическим моделям фильтрации раствора в низкопроницаемых пластах. Дополнительной проверкой качества подбора параметров является хорошее совпадение измеренных данных бокового каротажа и рассчитанных в подобранной модели сигналов.

На интервале нефтенасыщенного коллектора (хх03–хх22 м), по данным ВИКИЗ, относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  в среднем не превышает 60 и не проявляет частотной зависимости, по-видимому, из-за невысокой глинистости. Минимальное значение  $\epsilon$  ( $\approx 11$ ) определяется в наиболее карбонатизированной части коллектора (нижняя треть) с наибольшим УЭС. Значения  $\epsilon$  в коллекторе и вмещающих отложениях соответствуют значениям, определяемым по данным

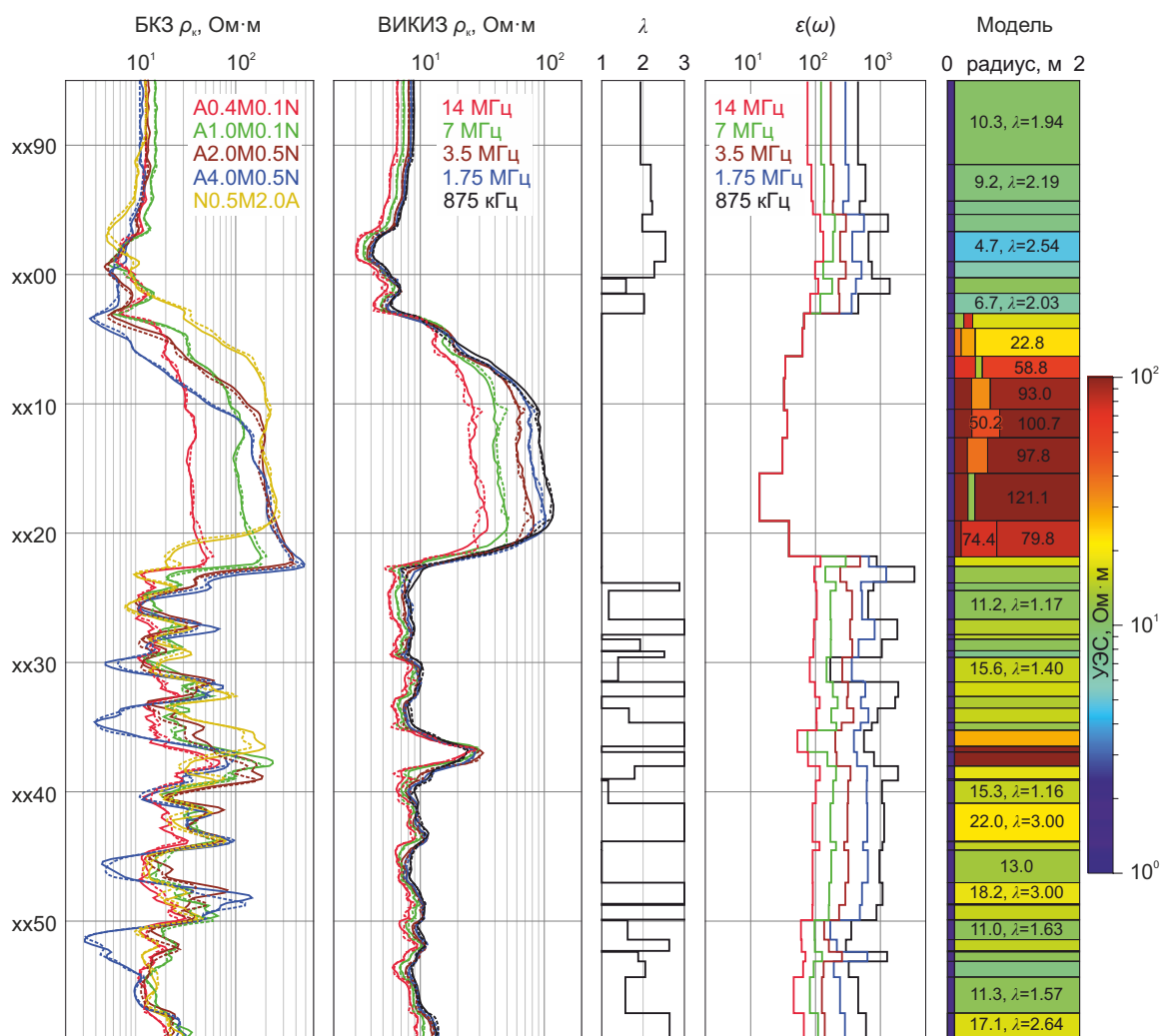
ГИС в других скважинах и на других площадях Западной Сибири.

Сложный радиальный профиль УЭС в прискважинной зоне юрского коллектора трудно объяснить только гидродинамическими процессами. В случае если породы на этой глубине являются достаточно хрупкими, при бурении может произойти их значительное уплотнение вблизи стенки скважины. Уплотнение снижает пористость и проницаемость прискважинной зоны, вследствие чего в ней значительно повышается УЭС, которое в нескольких пластах становится выше, чем УЭС зоны проникновения и даже неизменной части нефтенасыщенного коллектора. Такой эффект рассматривался ранее при совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ (на базе цилиндрически-слоистой модели) [Pavlova et al., 2018], измеренных в юрских отложениях Тевлинско-Русскинского месторождения.

Непроницаемые отложения, представленные в основном мощными аргиллитами и алевролитами, характеризуются большой анизотропией УЭС и частотной дисперсией диэлектрической проницаемости, что также соответствует ранее установленным зависимостям [Епов et al., 2019].

Таким образом, применение двумерной совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ, измеренных на интервале среднеюрских отложений Западной Сибири, приводит к согласованной геоэлектрической модели разреза со сложным строением прискважинной зоны на интервале нефтенасыщенного коллектора, с анизотропией УЭС, а также с частотно-зависимой диэлектрической проницаемостью на интервалах вмещающих аргиллитов и непроницаемых алевролитов.

Отметим, что определяемая по данным БКЗ электрическая анизотропия терригенных отложений подтверждается по данным электрокаротажа в сильнонаклонных скважинах, в значительной степени чувствительным к вертикальному УЭС, а также соответствует оценкам по данным зарубежных приборов [Kriegshauser et al., 2000; Kriegshauser, 2013; Faivre et al., 2002; Georgi et al., 2008; Cao Minh et al., 2008]. На электрофизические свойства пород в частотном диапазоне ВЭМКЗ влияют особенности строения порового пространства, форма зерен твердого вещества, соотношение флюидов, соленость пластовой воды, минеральный состав. В результате влияния внешнего электромагнитного поля возникает разномасштабная электрическая поляризация [Axelrod, 2012], которую можно описывать эффективным значением диэлектрической проницаемости. Аналогичный методический подход применяется в компании «Шлюмберже» при интерпретации данных индукционного каротажа во время бурения (частоты 0.4 и 2.0 МГц) [Anderson et al., 2007, 2008], по которым определяются эффективные значения относительной диэлектрической проницаемости, до десятков тысяч в пиритизированных глинистых сланцах. Значения, определяемые по данным ВЭМКЗ (как при совместной с данными БКЗ двумерной инверсии, так и по разности фаз и отношению амплитуд, измеряемым в аппаратуре СКЛ [Kayurov



**Рис. 2.** Результат совместной 2D-инверсии данных БКЗ и ВИКИЗ, измеренных в юрских отложениях Восточно-Сургутского месторождения.

Слева направо: сигналы БКЗ, сигналы ВИКИЗ, коэффициент анизотропии  $\lambda = \sqrt{\rho_v / \rho_h}$ , относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon(\omega)$ , модель горизонтального УЭС. Сплошные линии – рассчитанные сигналы, пунктирные – наблюдаемые.

**Fig. 2.** Joint 2D inversion of the LLS and VIKIZ data on the Jurassic deposits in the East Surgut field.

From left to right: LLS signals, VIKIZ signals, anisotropy coefficient  $\lambda = \sqrt{\rho_v / \rho_h}$ , relative dielectric permittivity  $\epsilon(\omega)$ , horizontal resistivity distribution. Lines show signals: solid – estimations from simulation, dashed – field measurements.

et al., 2015]), чаще всего не превышают одной тысячи и уменьшаются с повышением частоты зонда.

**Геоэлектрические модели доюрского фундамента.** Поиск залежей углеводородов в доюрском фундаменте Западной Сибири осложняется большим контрастом электрофизических свойств пород, который приводит к сложной форме сигналов электрокаротажа, измеренных в этих отложениях, а следовательно, к проблемам их интерпретации.

Для описания свойств трещиноватых отложений в общем случае необходимы трехмерные модели. На сегодняшний день трехмерная инверсия скважинных данных практически не используется из-за большого количества как вычислительных, так и методических трудностей. В то же время двумерная инверсия сигналов зондирующих методов скважинной электротомии, например БКЗ, является информативным инструментом

при исследовании меловых осадочных разрезов и естественной является попытка ее применения и в палеозойских отложениях. Однако перед применением этого подхода следует ответить на некоторые вопросы, важнейшие из которых – определение характера изменений измеряемых сигналов при наличии трещиноватости палеозойских пород и влияние этих изменений на результаты двумерной инверсии.

Для трещиноватых пород характерны трещины, лежащие в субвертикальной плоскости. Они наблюдаются как в керновом материале, так и по данным акустических или электрических имиджеров. Естественная незацементированная трещина заполняется буровым раствором во время бурения настолько, насколько позволяет соотношение давлений – гидростатического в скважине и пластового. При другом механизме образования трещина возникает в момент бурения из-за

неравномерности механических напряжений массива породы и также заполняется буровым раствором. Для оценки применимости двумерной инверсии данных БКЗ в трещиноватых породах, к которым относятся палеозойские отложения Арчинского месторождения, проведен анализ сигналов, рассчитанных в трехмерных моделях сред с единичной вертикальной трещиной (рис. 3).

При расчете сигналов БКЗ (зонды А0.2М0.1N, А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, А4.0М0.5N) применялся конечно-разностный алгоритм моделирования [Surodina, Nesterova, 2015]. Верификация сигналов нескольких зондов осуществлялась с помощью алгоритма, основанного на методе конечных элементов (автор ПО – О.В. Нечаев, ИНГГ СО РАН).

Рассчитанные в трехмерных моделях с трещиной сигналы БКЗ были подвергнуты двумерной инверсии. Получены параметры моделей разной сложности: изотропных и анизотропных, радиально однородных и с измененной прискважинной зоной на интервале распространения трещины. Поскольку интервал трещины хорошо выделяется при визуальном анализе диаграмм сигналов, а форма изменения сигналов аналогична таковой при пересечении пласта, на интервале трещины горизонтальными границами выделялся пласт (в соответствии с обычными правилами выделения пластов).

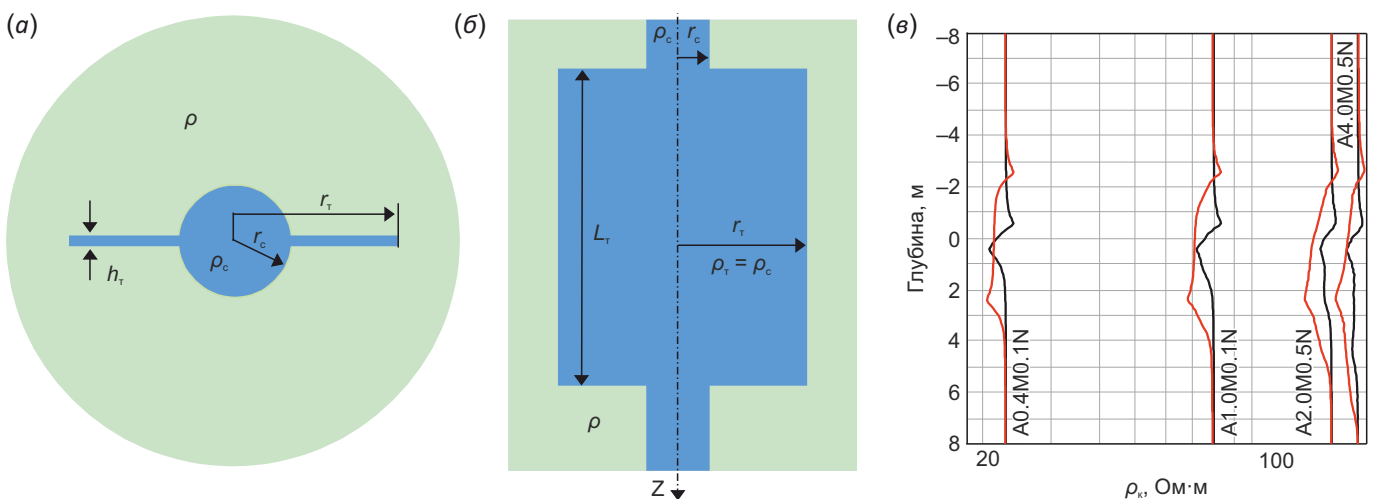
При анализе результатов инверсии оказалось, что в характерных для палеозойских отложений Арчинского месторождения условиях влияние на сигналы БКЗ вертикальной трещины, проходящей через ось скважины, наиболее эквивалентно влиянию зоны проникновения

с пониженным относительно неизменной части пласта значением УЭС. Результат инверсии сигналов в изотропной модели с понижающей зоной проникновения характеризуется наименьшими невязками, не превышающими 1 % вдоль всего профиля измерений. На всем рассматриваемом интервале восстанавливается близкое к истинному значение УЭС пласта. Следовательно, для исследования трещиноватых отложений можно использовать инструменты двумерной инверсии сигналов БКЗ: пониженные значения УЭС в прискважинной зоне, полученные по результатам двумерной инверсии на базе изотропной модели, могут являться диагностическим признаком наличия высокопроницаемых трещин.

Подход опробован на практических данных. Рассмотрен пример применения алгоритма двумерной численной инверсии данных БКЗ в интервале сложнопостроенных высокоомных карбонатных коллекторов доюрского комплекса, вскрытых скважиной на глинистом буровом растворе (Арчинское нефтегазоконденсатное месторождение, Томская область (рис. 4)).

Выбор интервала палеозойских отложений для численного анализа определялся наличием в двух его местах интервалов перфорации и данных о притоке, полученном во время проведения испытаний. Протяженность интервала (более 100 м) определяется большой зоной формирования сигнала градиент-зонда, неоднородностью отложений и большим электрическим контрастом модели.

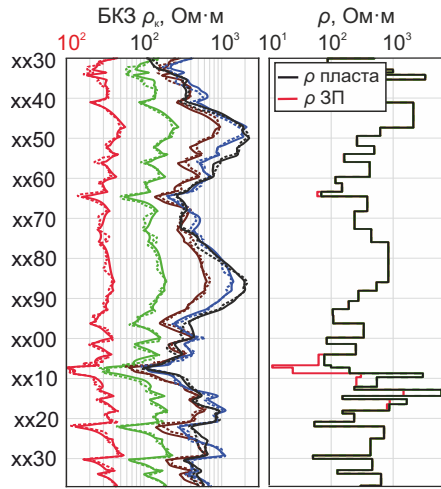
В полученной геоэлектрической модели по наличию контрастной зоны проникновения с пониженными относительно неизменной части пласта УЭС



**Рис. 3.** Модель пересеченных скважиной высокоомных отложений, осложненных вертикальной трещиной. (а) – сечение горизонтальной плоскостью; (б) – сечение вертикальной плоскостью; (в) – расчетные сигналы зондов БКЗ. УЭС пласта  $\rho=100, 1000$  Ом·м; УЭС бурового раствора  $\rho_c=1$  Ом·м, радиус скважины  $r_c=0.108$  м; толщина трещины  $h_f=1$  мм, ее длина  $L=1$  и 5 м, радиус  $r_f=0.5$  и 0.8 м,  $\rho_f=\rho_c=1$  Ом·м. Сигналы приведены для  $\rho=100$  Ом·м,  $L=1$  и 5 м (черные и красные линии) и для  $r_f=0.5$  м.

**Fig. 3.** Model of borehole-penetrated high-resistivity deposits complicated by a vertical fracture. (a) – horizontal plane section; (б) – vertical plane section; (в) – simulated LLS signals. Formation resistivity  $\rho=100, 1000$  ohm·m; drill-mud resistivity  $\rho_c=1$  ohm·m, borehole radius  $r_c=0.108$  m; fracture aperture  $h_f=1$  mm; fracture length  $L=1$  and 5 m; borehole radius  $r_f=0.5$  and 0.8 m;  $\rho_f=\rho_c=1$  ohm·m. The signals are given for  $\rho=100$  ohm·m,  $L=1$  and 5 m (black and red lines) and for  $r_f=0.5$  m.



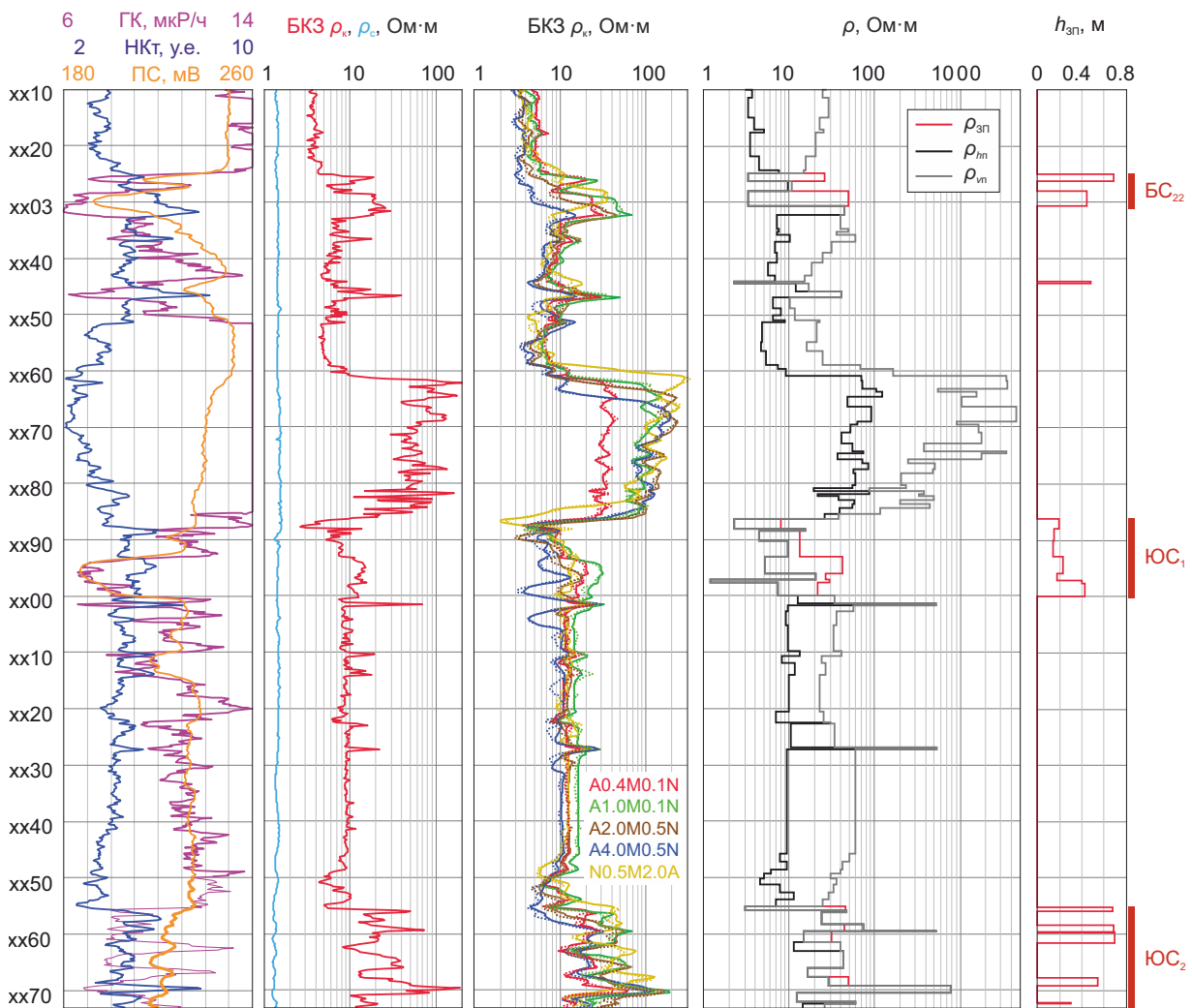


**Рис. 4.** Результат 2D-инверсии данных БКЗ, измеренных в палеозойских отложениях Арчинского месторождения, при условии наличия в пластах зоны проникновения.

Слева направо: сигналы БКЗ, УЭС пластов и зоны проникновения. Сплошные линии – рассчитанные сигналы, пунктирные – наблюдаемые.

**Fig. 4.** 2D inversion of the LLS data on the Paleozoic deposits in the Archinskoe field. The measurements were taken in the presence of invaded zones in the formations.

From left to right: LLS signals, resistivity values of the formations and invaded zones. Lines show signals: solid – estimations from simulation, dashed – field measurements.



**Рис. 5.** Практические данные каротажа и параметры геоэлектрической модели баженовской свиты и прилегающих юрских и меловых отложений Восточно-Сургутского месторождения.

Слева направо: гамма-каротаж (ГК), нейтронный каротаж (НКТ), потенциал самополяризации (ПС); боковой каротаж (кажущееся УЭС  $\rho_{к\text{БК}}$ ), УЭС бурового раствора  $\rho$ ; боковое каротажное зондирование (кажущееся УЭС  $\rho_{к\text{БКЗ}}$ ); УЭС пласта  $\rho_p, \rho_v$ ; УЭС зоны проникновения  $\rho_{ЗП}$ ; толщина зоны проникновения  $h_{ЗП}$ .

**Fig. 5.** Field log data and geoelectric model parameters of the Bazhenov formation and the adjacent Jurassic and Cretaceous deposits in the East Surgut field.

From left to right: gamma-ray (ГК), neutron (НКТ) and self-potential (ПС) logs; LLS logs (apparent resistivity  $\rho_{к\text{БК}}$ ), drill-mud resistivity log  $\rho$ ; LLS logs (apparent resistivity  $\rho_{к\text{БКЗ}}$ ); formation resistivity  $\rho_p, \rho_v$ ; resistivity of invaded zone  $\rho_{ЗП}$ ; invaded zone thickness.

выделяется, предположительно, трещиноватый интервал. При пластовых испытаниях этого интервала получен приток нефти. Сравнение результатов инверсии данных БКЗ с результатами испытания пластов показывает применимость метода и современного инструментария численной обработки данных для поиска залежей углеводородов в аналогичных по свойствам отложениях.

**Геоэлектрическая модель баженовской свиты.** В комплекс ГИС во всех вертикальных скважинах Восточно-Сургутского месторождения входит метод БКЗ, позволяющий детально исследовать электрофизические свойства отложений. Выявление коллекторов основывается на комплексном анализе данных всего представленного комплекса (рис. 5). На основе пластового подхода проводится численная инверсия данных БКЗ в параметры двумерной геоэлектрической модели [Petrov et al., 2019; Sukhorukova et al., 2017; Eпов et al., 2019], с определением значений УЭС пластов, уточнением положения их горизонтальных границ, а также подбором оптимальных параметров зоны проникновения. В результате инверсии получается детализированная геоэлектрическая модель: для анизотропных непроницаемых отложений глин и баженовской свиты определяются значения УЭС в горизонтальной плоскости и в вертикальном направлении, для проницаемых отложений – УЭС пласта и толщина и УЭС зоны проникновения.

Пример практических данных для одной скважины и параметров полученной модели приведен на рис. 5. Качество подбора подтверждается хорошим совпадением рассчитанных в ней сигналов БКЗ с измеренными (сплошные и пунктирные линии соответственно), а также проверяется сравнением рассчитанных и измеренных сигналов бокового каротажа, которые не участвовали в подборе. Проницаемые пласты выделяются по наличию в модели зоны проникновения, УЭС которой показано красным на диаграмме "УЭС пласта", а толщина приведена на крайнем правом графике. В непроницаемых глинистых пластах и баженовской свите выявляются электрически контрастная слоистость и анизотропия УЭС.

После построения геоэлектрических моделей для нескольких близко расположенных скважин месторождения было выявлено достаточно хорошее совпадение геоэлектрических характеристик основных пластов. Это явилось основанием для построения осредненной модели, на которой базируется численный анализ возможных параметров установки импульсных межскважинных зондирований.

### 3. ОБОСНОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МЕЖСКВАЖИНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Для исследования возможностей изучения свойств коллектора или баженовской свиты из расположенной выше или ниже горизонтальной скважины был выбран разрез Восточно-Сургутского месторождения. Восточно-Сургутское месторождение относится к крупным

многопластовым. Промышленная нефтеносность в верхне-среднеюрских отложениях наблюдается в пластах ЮС<sub>1-2</sub>, а в нижнемеловых отложениях – БС<sub>21-22</sub>. Разрез представлен терригенными отложениями: неравномерно переслаивающимися песчаниками, алевролитами и аргиллитами с маломощными прослоями карбонатных пород и углей.

#### 3.1. Программное обеспечение численного моделирования

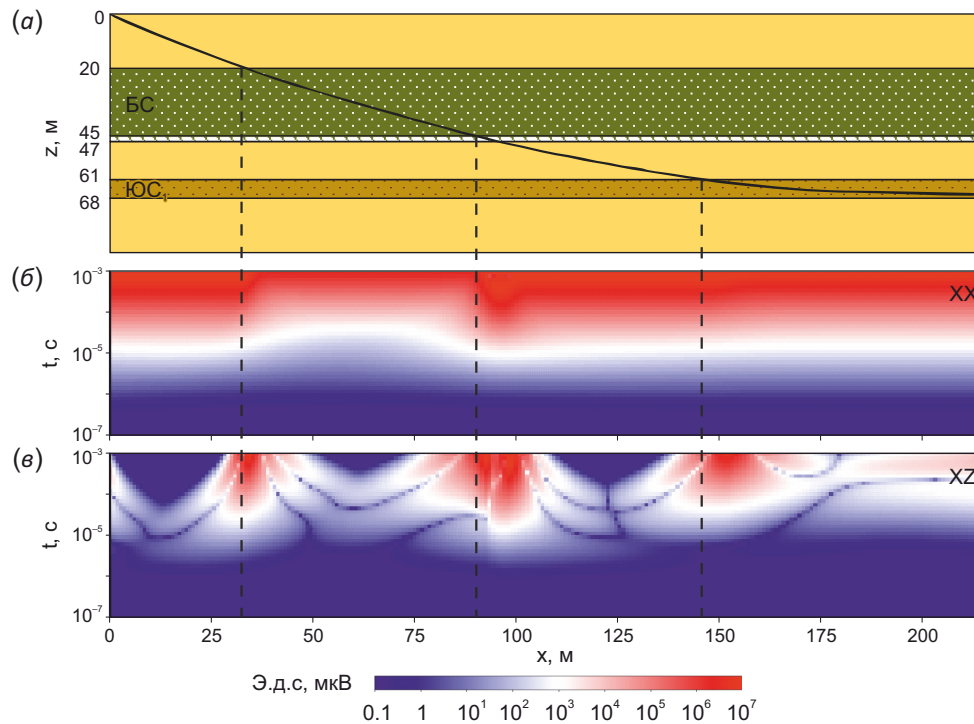
Анализ электромагнитных сигналов и их чувствительности к геоэлектрическим параметрам среды выполняется в горизонтально-слоистой изотропной модели, где каждый слой характеризуется значением УЭС и мощностью. Источником поля является произвольно ориентированная катушка с током, в приемных катушках измеряется э.д.с. в зависимости от времени. В наклонно-горизонтальных скважинах используется система координат прибора, где ось Z направлена вдоль скважины. Если источник и приемник лежат в плоскости Oхz, то ненулевыми являются компоненты поля XX, YY, ZZ, XZ и ZX, где первый символ означает ориентацию генераторной катушки, а второй – измеряемую компоненту поля.

Созданы алгоритм и компьютерная программа моделирования сигналов импульсных зондирований, основанная на интегральном преобразовании Фурье частотно-зависимого электромагнитного поля. Эффективность алгоритма обеспечивается специально организованным интегрированием, требующим минимального количества вычислений частотных задач [Nikitenko et al., 2020; Glinskikh et al., 2020].

Для моделирования сигналов импульсных электромагнитных зондирований проведены анализ геофизических материалов в нескольких близко расположенных вертикальных скважинах и количественная интерпретация данных электрокаротажа. Вблизи баженовской свиты находится нефтесодержащий коллектор ЮС<sub>1</sub>, который вскрывается горизонтальной скважиной. По данным каротажа в вертикальных скважинах в результате инверсии строится детальная геоэлектрическая модель, затем значения УЭС ее пластов осредняются по продольной электропроводности для получения обобщенной модели отложений для моделирования сигналов импульсного электромагнитного зондирования (см. рис. 3).

#### 3.2. Результаты моделирования

На рис. 6 приведены уровни э.д.с. для XX- и XZ-компонент в зависимости от времени и положения зонда (координатой зонда является его центр). Для удобства вертикальными пунктирными линиями отмечены пересечения границ БС и ЮС<sub>1</sub> скважиной. Рассматривается компактная зондирующая установка с длиной зонда (расстояние между источником и приемником) 1 м, дипольный магнитный момент зонда – 100 А·м<sup>4</sup>. Уровни измеряемых сигналов показаны цветом: красному соответствуют высокие значения, синему – низкие.



**Рис. 6.** Обобщенная изотропная геоэлектрическая модель пластов разреза и траектория скважины с горизонтальным завершением (а). Э.д.с. (мкВ) для XX- (б) и ZX-компонент (в) в зависимости от времени и положения зонда при импульсном электромагнитном зондировании баженовской свиты из скважины с горизонтальным завершением в пласте ЮС<sub>1</sub>. Цветовые обозначения (а): желтый – глинистые породы и аргиллиты (5–10 Ом·м), зеленый – бажениты (55 Ом·м), коричневый – коллектор ЮС<sub>1</sub> (20 Ом·м), серый – глины георгиевской свиты (2 Ом·м).

**Fig. 6.** Generalized isotropic geoelectric model of the section strata and the path of the well with horizontal completion (a). Electrodynamics force (μV) for XX- (b) and ZX-components (c) as function of time, and positions of the tool during TEM sounding of the Bazhenov formation from the well with horizontal completion in the ЮС<sub>1</sub> reservoir. Colour codes (a): yellow – argillaceous rocks and mudstone (5–10 ohm·m), green – bazhenite (55 ohm·m), brown – YuС<sub>1</sub> reservoir (20 ohm·m), gray – Georgiev Formation shale (2 ohm·m).

Как следует из рис. 6, для диагональной компоненты XX наблюдается изменение характера поведения временных зависимостей сигналов при пересечении границ пластов. Перекрестная компонента XZ показывает положение границы максимумом сигнала. С использованием зонда небольшой длины и набора компонент в интервале верхнеюрских отложений разрез уверенно расчленяется, включая выделение маломощных пропластков. Результаты расчетов показывают, что на Восточно-Сургутском месторождении импульсное зондирование баженовской свиты из скважины с субгоризонтальным завершением в нефтеносном пласте-коллекторе ЮС<sub>1</sub> верхнеюрского нефтегазоносного комплекса реализуемо для решения задачи картирования границ свиты и прослеживания ее латеральных неоднородностей.

**4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Новые разработанные в ИНГГ СО РАН алгоритмы и программы численного моделирования и инверсии данных электрических и электромагнитных зондирований в нефтегазовых скважинах оказываются эффективными для исследования электрофизических характеристик меловых, юрских и палеозойских отложений Западной

Сибири. Геологическая информативность результатов инверсии повышается при применении специальных методических подходов к обработке данных электрокаротажа. По комплексу данных гальванических и электромагнитных методов кроме традиционно рассматриваемого параметра – удельного электрического сопротивления – определяются электрическая анизотропия и частотная дисперсия диэлектрической проницаемости. Выполнено обоснование технологии картирования и пространственной локализации латеральных неоднородностей баженовской свиты на основе импульсных электромагнитных зондирований. Теоретически показана возможность их применения для изучения свиты из сильнонаклонных и субгоризонтальных скважин, пробуренных в верхне-среднеюрских пластах.

**5. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES**

Anderson B.I., Barber T.D., Lüling M.G., Rasmus J., Sen P.N., Tabanou J.R., Haugland S.M., 2007. Observations of Large Dielectric Effects on LWD Propagation-Resistivity Logs. In: Proceedings of SPWLA 48th Annual Logging Symposium (June 3–6, 2007). Austin, Texas, USA, paper BB.  
 Anderson B., Barber T., Lüling M., Sen P., Taherian R., Klein J., 2008. Identifying Potential Gas-Producing Shales

from Large Dielectric Permittivities Measured by Induction Quadrature Signals. In: Proceedings of SPWLA 49th Annual Logging Symposium (May 25–28, 2008). Austin, Texas, USA, paper HHHH.

Antonov Yu.N., Smetanina L.V., Mikhailov I.V., 2012. Rim Zone as a Sign of Mobile Oil in Terrigenous Reservoirs. *Karotazhnik*, 6, 16–40 (in Russian) [Антонов Ю.Н., Сметанина Л.В., Михайлов И.В. Окаймляющая зона как признак подвижной нефти в терригенных коллекторах // Каротажник. 2012. № 6. С. 16–40].

Axelrod S.M., 2012. New Trends in Dielectric Logging (from Foreign Press Materials). *Karotazhnik* 4, 78–112 (in Russian) [Аксельрод С.М. Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати) // Каротажник. 2012. № 4. С. 78–112].

Cao Minh Ch., Clavaud J.-B., Sundararaman P., Froment S., Caroli E., Billon O., Davis G., Fairbairn R., 2008. Graphical Analysis of Laminated Sand-Shale Formations in the Presence of Anisotropic Shales. *Petrophysics* 49 (5), 395–405.

Cartis C., Fiala J., Marteau B., Roberts L., 2018. Improving the Flexibility and Robustness of Model-Based Derivative-Free Optimization Solvers. *ACM Journals* 45 (3), 1–41. <https://doi.org/10.1145/3338517>.

Eпов M.I., Glinskikh V.N., Petrov A.M., Sukhorukova K.V., Fedoseev A.A., Nechaev O.V., Nikitenko M.N., 2019. Frequency Dispersion of Electrophysical Characteristics and Resistivity Anisotropy of the Bazhenov Formation Deposits According to Resistivity Logging Data. *Oil Industry* 9, 62–64 (in Russian) [Эпов М.И., Глинских В.Н., Петров А.М., Сухорукова К.В., Федосеев А.А., Нечаев О.В., Никитенко М.Н. Частотная дисперсия электрофизических характеристик и электрическая анизотропия пород баженновской свиты по данным электрокаротажа // Нефтяное хозяйство. 2019. № 9. С. 62–64]. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-9-62-64>.

Eпов M.I., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V., Petrov A.M., Rabinovich M., Weston H., Tyurin E., Wang G.L. et al., 2020. Comparison of the Russian and Western Resistivity Logs in Typical Western Siberian Reservoir Environments: A Numerical Study. *Petrophysics* 61 (1), 38–71. <https://doi.org/10.30632/PJV61N1-2020a1>.

Eпов M., Yeltsov I., Kashevarov A., Sobolev A., Ulyanov V., 2002. Time Evolution of the near Borehole Zone in Sandstone Reservoir from the Data of Repeated High-Frequency Electromagnetic Logging. In: Proceedings of SPWLA 43rd Annual Logging Symposium (June 2–5, 2002). Oiso, Japan, paper ZZ.

Faivre O., Barber T., Jammes L., Vuhoang D., 2002. Using Array Induction and Array Laterolog Data to Characterize Resistivity Anisotropy in Vertical Wells. In: Proceedings of SPWLA 43th Annual Logging Symposium (June 2–5, 2002). Oiso, Japan, paper M.

Georgi D.T., Schön J.H., Rabinovich M., 2008. Biaxial Anisotropy: Its Occurrence and Measurement with Multi-component Induction Tools. In: Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 21–24, 2008). Denver, Colorado, USA, paper MS. <https://doi.org/10.2118/114739-MS>.

Glinskikh V., Gornostalev D., Mikhaylov I., Nikitenko M., 2020. Transient Electromagnetic Soundings for Mapping the Spatially Heterogeneous Bazhenov Formation. In: Proceedings of EAGE 2020 Annual Conference & Exhibition Online (December 8–11, 2020, Amsterdam). Amsterdam, Netherlands, p. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202011531>.

Gurari F.G., 1961. On Oil and Gas Prospecting in the Mesozoic Rocks of the West Siberian Lowland. In: Proceedings of the Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials. Vol. 17. Gostoptekhizdat, Leningrad, p. 81–92 (in Russian) [Гурари Ф.Г. О поисках нефти и газа в мезозое Западно-Сибирской низменности // Труды СНИИГГиМС. Л.: Гостоптехиздат, 1961. Вып. 17. С. 81–92].

Kashevarov A.A., Eltsov I.N., Eпов M.I., 2003. Hydrodynamic Model of the Formation of an Invasion Zone during Well Drilling. *Applied Mechanics and Technical Physics* 44 (6), 148–157 (in Russian) [Кашеваров А.А., Ельцов И.Н., Эпов М.И. Гидродинамическая модель формирования зоны проникновения при бурении скважин // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44. № 6. С. 148–157].

Kayurov K.N., Eremin V.N., Petrov A.N., Sukhorukova K.V., Nikitenko M.N., Arzhantsev V.S., 2015. SKL Hardware Systems for Logging in Oil-Gas Wells and Its Interpretation Base. *Oil Industry* 9, 38–43 (in Russian) [Каюров К.Н., Еремин В.Н., Петров А.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Аржанцев В.С. Аппаратурный комплекс СКЛ для каротажа в нефтегазовых скважинах и его интерпретационная база // Нефтяное хозяйство. 2015. № 9. С. 38–43].

Kneller L.E., Potapov A.P., 2010. Determination of Resistivity of Formations in Case of Radial and Vertical Heterogeneity of Well Sections. *Geophysics* 1, 52–64 (in Russian) [Кнеллер Л.Е., Потапов А.П. Определение удельного электрического сопротивления пластов при радиальной и вертикальной неоднородности разреза скважин // Геофизика. 2010. № 1. С. 52–64].

Knizhnerman L.A., Khusid M.D., Dyakonova T.F., 2017. Application of the Successive Lateral Correction Method to Solving the Axisymmetric Inverse Problem of Electrical and Induction Logging for Geological Media with Diagonally Anisotropic Formations. *Geophysics Special Issue*, 118–125 (in Russian) [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 (спецвыпуск). 2017. С. 118–125].

Kontorovich A.E., Berman E.L., Bogorodskaya L.I., Vinokur B.G., Kolganova M.M., Lipnitskaya L.F., Melnikova V.M., Stasova O.F., Fomichev A.S., 1971. Geochemistry of the Jurassic and Lower Cretaceous Sediments of the West Siberian Lowland. Proceedings of the Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials. Petroleum Geology Series. Vol. 36. Nedra, Moscow, 251 p. (in Russian) [Конторович А.Э., Берман Е.Л., Богородская Л.И.,

Винокур Б.Г., Колганова М.М., Липницкая Л.Ф., Мельникова В.М., Стасова О.Ф., Фомичев А.С. Геохимия юрских и нижнемеловых отложений Западно-Сибирской низменности // Труды СНИИГГиМС. Серия Нефтяная геология. М.: Недра, 1971. Вып. 36. 251 с.]

Kriegshauser B., 2013. On the Value of Electrical Anisotropy in Formation Evaluation. In: Proceedings of 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF (August 26–29, 2013). Rio de Janeiro, Brazil, p. 1924–1929. <https://doi.org/10.1190/sbgf2013-396>.

Kriegshauser B., Fanini O., Forgang S., Itskovich G., Rabinovich M., Tabarovskiy L., Yu L., Eпов M., van der Horst M., 2000. A New Multi-Component Induction Logging Tool to Resolve Anisotropic Formations. In: Proceedings of SPWLA 41st Annual Logging Symposium (June 4–7, 2000). Dallas, Texas, USA, paper D.

Nazarova L.A., Nazarov L.A., Eпов M.I., El'tsov I.N., 2013. Evolution of Geomechanical and Electro-Hydrodynamic Fields in Deep Well Drilling in Rocks. *Journal of Mining Science* 49, 704–714. <https://doi.org/10.1134/S1062739149050031>.

Nechaev O.V., Glinskikh V.N., 2017. Efficient Direct Method for Solving the Inverse Problem of Electrical Logging in Oil-Gas Wells. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies* 15, 53–63 (in Russian) [Нечаев О.В., Глинских В.Н. Быстрый прямой метод решения обратной задачи электрического каротажа в нефтегазовых скважинах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2017. № 15. С. 53–63].

Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Eпов M.I., Gornostalev D.I., Danilovsky K.N., Mikhailov I.V., 2020. Development of a Pulsed Electromagnetic Sounding Method for Studying the Bazhenov Formation. In: Saint Petersburg 2020. Geosciences: Converting Knowledge into Resources. Proceedings of 9th International Geological and Geophysical Conference (November 16–19, 2020). EAGE, p. 1–6 (in Russian) [Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Эпов М.И., Горносталев Д.И., Даниловский К.Н., Михайлов И.В. Разработка метода импульсных электромагнитных зондирований для изучения баженовской свиты // Санкт-Петербург 2020. Геонауки: трансформируем знания в ресурсы: Материалы 9-й Международной геолого-геофизической конференции (16–19 ноября, 2020 г.). EAGE, 2020. С. 1–6]. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202053067>.

Pavlova D.M., El'tsov I.N., Nesterova G.V., 2018. Interpretation of Downhole Geoelectric Data Based on a Unified Multi-Physical Reservoir Model for the Jurassic Oil Reservoir. In: Subsoil Use. Mining. Directions and Technologies of Prospecting, Exploration and Development of Mineral Deposits. Economics. Geoecology. Proceedings of the International Scientific Conference (April 23–27, 2018). Vol. 4. Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk, p. 53–60 (in Russian) [Павлова Д.М., Ельцов И.Н., Нестерова Г.В. Интерпретация данных скважинной геоэлектрики на основе единой многофизической модели пласта на примере юрского нефтяного коллектора // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений

полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Материалы Международной научной конференции (23–27 апреля 2018 г.). Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2018. Т. 4. С. 53–60].

Petrov A.M., Nechaev O.V., Sukhorukova K.V., 2018. Efficient Joint Two-Dimensional Inversion of Electromagnetic and Galvanic Logging Data and Determination of Vertical Resistance. In: Subsoil Use. Mining. Directions and Technologies of Prospecting, Exploration and Development of Mineral Deposits. Economics. Geoecology. Proceedings of the International Scientific Conference (April 23–27, 2018). Vol. 4. Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk, p. 90–97 (in Russian) [Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Быстрая совместная двумерная инверсия данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований с определением вертикального сопротивления // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Материалы Международной научной конференции (23–27 апреля 2018 г.). Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2018. Т. 4. С. 90–97].

Petrov A.M., Nechaev O.V., Sukhorukova K.V., 2019. Two-Dimensional Inversion of Russian Electric Logging Signals Measured at Intervals of Complex Sediments. In: Geomodel 2019. Proceedings of 21st Conference on Geological Exploration and Development of Oil and Gas Fields (September 9–13, 2019). EAGE, p. 1–5 (in Russian) [Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Двумерная инверсия сигналов российского электрокаротажа, измеренных на интервалах сложнопостроенных отложений // Геомодель 2019: Тезисы докладов 21-й конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (9–13 сентября, 2019 г.). EAGE, 2019. С. 1–5]. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201950044>.

Shaidurov V.V., 1989. Multigrid Finite Element Methods. Nauka, Moscow, 288 p. (in Russian) [Шайдуров В.В. Многосеточные методы конечных элементов. М.: Наука, 1989. 288 с.].

Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Nechaev O.V., 2017. Numerical Inversion of Electrical Logging Data in Intervals of Anisotropic Clay Deposits. *Karotazhnik* 4 (274), 34–48 (in Russian) [Сухорукова К.В., Петров А.М., Нечаев О.В. Численная инверсия данных электрокаротажа в интервалах анизотропных глинистых отложений // Каротажник. 2017. № 4 (274). С. 34–48].

Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Nechaev O.V., 2020. Geoelectric Models of Cretaceous Reservoirs of West Siberia by the Results of Integrated Interpretation of Electric Log Data. *Geology and Mineral Resources of Siberia* 3 (41), 77–86 (in Russian) [Сухорукова К.В., Петров А.М., Нечаев О.В. Геоэлектрические модели меловых коллекторов Западной Сибири по результатам комплексной интерпретации данных электрокаротажа // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2020. № 3 (41). С. 77–86]. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2020-3-77-86>.

Surodina I.V., Nesterova G.V., 2015. Modeling of Indications of VIKIZ and LLS Probes on Graphic Processors. In:

Petrophysics of Complex Reservoirs: Problems and Prospects for 2015. Collection of EAGE Articles 85–94 (in Russian) [Суродина И.В., Нестерова Г.В. Моделирование показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ на графических процессорах // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2015: Сборник статей EAGE. 2015. С. 85–94].

Ulugergerli E.U., 2011. Two Dimensional Combined Inversion of Short- and Long-Normal DC Resistivity Well Log Data. *Journal of Applied Geophysics* 73 (2), 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.12.004>.

Vyshemirsky V.S. (Ed.), 1986. Bazhenov Horizon of West Siberia (Stratigraphy, Paleogeography, Ecosystem, and Oil-Bearing Potential). *Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Academy of*

*Science. Nauka, Novosibirsk*, 217 p. (in Russian) [Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность) // Труды ИГиГ СО АН СССР / Ред. В.С. Вышемирский. Новосибирск: Наука, 1986. 217 с.].

Yeltsov I.N., Nazarov L.A., Nazarova L.A., Nesterova G.V., Eпов M.I., 2012. Logging Interpretation Taking into Account Hydrodynamical and Geomechanical Processes in an Invaded Zone. *Doklady Earth Sciences* 445, 1021–1024. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1208020X>.

Yeltsov I.N., Nazarova L.A., Nazarov L.A., Nesterova G.V., Sobolev A.Yu., Eпов M.I., 2014. Geomechanics and Fluid Flow Effects on Electric Well Logs: Multiphysics Modeling. *Russian Geology and Geophysics* 55 (5–6), 775–783. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.05.020>.