

## СОВМЕСТНАЯ ЧИСЛЕННАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ИНДУКЦИОННЫХ И ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ КАРОТАЖНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ В МОДЕЛЯХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД С ОСЕВОЙ СИММЕТРИЕЙ

И.В. Михайлов<sup>1,2</sup>, В.Н. Глинских<sup>1,2</sup>, М.Н. Никитенко<sup>1</sup>, И.В. Суродина<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

<sup>3</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6, Россия

Разработан вычислительный алгоритм совместной инверсии данных индукционных и гальванических каротажных зондирований в двумерных моделях геологических сред. Он основан на сеточном методе конечных разностей и нелинейной минимизации и предназначен для создания реалистичных геоэлектрических моделей сложнопостроенных флюидонасыщенных геологических сред. Алгоритм протестирован и верифицирован на зашумленных синтетических диаграммах электрокаротажных зондирований. Проведено сопоставление результатов двумерной инверсии и традиционного подхода в рамках слоисто-однородных моделей сред. С использованием разработанного алгоритма выполнена совместная двумерная инверсия практических данных с Федоровского и Восточно-Сургутского месторождений Широного Приобья.

*Совместная инверсия, электрокаротажные зондирования, ВЭМКЗ, БКЗ, осесимметричная модель, удельное электрическое сопротивление.*

## JOINT INVERSION OF INDUCTION AND GALVANIC LOGGING DATA IN AXISYMMETRIC GEOLOGICAL MODELS

I.V. Mikhaylov, V.N. Glinskikh, M.N. Nikitenko, and I.V. Surodina

We have developed a computational algorithm for joint inversion of array induction and galvanic data in 2D models. It is based on the finite-difference solver and nonlinear minimization and is designed to develop realistic geoelectrical models of complex fluid-saturated formations. The algorithm is tested and verified on noisy synthetic induction and galvanic data. The obtained 2D inversion results are compared with those corresponding to the traditional 1D radial approach. The developed algorithm was used to conduct joint 2D inversion of VEMKZ and BKZ logs from the Fedorovskoe and Vostochno-Surgutskoe oil fields in the E–W striking Ob' River area.

*Joint inversion, electrical logging, VEMKZ, BKZ, axisymmetric model, electrical resistivity*

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значительно усложнился и расширился круг задач промышленной геофизики с повсеместным введением в разработку и эксплуатацию новых типов залежей углеводородов сложного геологического строения. Это, в свою очередь, приводит к необходимости совершенствования аппаратных комплексов и их программно-методического обеспечения для обработки и интерпретации данных геофизических исследований в скважинах. Среди новых импортозамещающих каротажных технологий широкое распространение при изучении скважин, бурящихся на нефть и газ, получил аппаратный комплекс СКЛ, который, наряду с основными широко используемыми геофизическими методами, включает индукционные и гальванические каротажные зондирования [Эпов и др., 2010]. Использование этого комплекса позволяет экономить спускоподъемные операции, а одновременные измерения исключают необходимость взаимной увязки диаграмм по глубине скважины. Электрокаротажные зондирования нашли применение при технологических операциях бурения на всех этапах строительства нефтегазовых скважин – от геонавигации до шаблонирования [Каюров и др., 2014; Эпов и др., 2015].

Создание новых аппаратных комплексов для эффективного изучения нефтегазовых залежей приводит к необходимости разработки программно-алгоритмических средств, направленных на повышение достоверности количественного определения параметров неоднородных коллекторов. Особо

важным при этом является увеличение точности определения насыщения пластов-коллекторов по данным методов скважинной электротометрии. Одним из таких путей является привлечение реалистичных интерпретационных моделей геологической среды. Эти модели должны включать описание сложного пространственного распределения электрофизических параметров и учитывать различные физические эффекты. При этом их привлечение возможно только с использованием численного моделирования и инверсии в рамках решений многомерных задач вычислительной электродинамики.

Традиционно определение характера насыщения коллекторов проводят по данным индукционных или гальванических каротажных зондирований на основе анализа радиального профиля удельного электрического сопротивления (УЭС), определяемого в рамках одномерной цилиндрически-слоистой интерпретационной модели среды [Эпов, Никитенко, 1993]. Характер радиального распределения УЭС обусловлен процессом вытеснения пластовой жидкости фильтратом бурового раствора и изменением минерализации в прискважинной зоне при вскрытии пласта. Однако при интерпретации в пластах ограниченной мощности, характеризующихся неоднородной зоной проникновения и переменным по глубине нефтесодержанием, необходимо учитывать влияние перекрывающих и подстилающих отложений. Кроме этого, наличие повсеместно встречающихся в коллекторах проводящих глинистых и высокоомных (уплотненных песчаных и карбонатных) маломощных прослоев приводит при интерпретации к существенным погрешностям определения УЭС и последующим недостоверным оценкам флюидонасыщения. Чтобы этого избежать, необходимо использовать интерпретационную геоэлектрическую модель геологической среды с осевой симметрией, которая позволяет учесть как радиальное, так и вертикальное распределение УЭС [Эпов и др., 2013; Михайлов, Глинских, 2015; Nikitenko et al., 2015].

Комплексирование методов скважинной электротометрии является одним из широко используемых приемов повышения эффективности их применения при изучении коллекторов нефти и газа сложного строения [Кнеллер, Потапов, 1992; Mezzatesta et al., 1994; Rabinovich, Tabarovsky, 2001; Yang, 2001; Shanjun et al., 2007]. В силу разной чувствительности и разрешающей способности индукционных и гальванических каротажных зондирований обеспечивается возможность повышения достоверности определения УЭС по комплексу методов. Совместная инверсия данных электрокаротажных зондирований позволяет получить единую геоэлектрическую модель. Построение согласованной интерпретационной модели приводит к сужению области неоднозначности (или эквивалентности) при определении модельных параметров, что обусловлено разными физическими принципами возбуждения поля и измерения сигналов, а также разным влиянием частей среды на регистрируемые сигналы. Известно, что проводящие области среды оказывают большее влияние на сигналы индукционных методов, в то время как высокоомные – на гальванические.

Рассмотрение процессов разной физической природы в рамках единой интерпретационной модели позволяет более точно оценивать свойства пластов-коллекторов. Так, широко используется комплексная петрофизическая интерпретация данных электрокаротажных зондирований на основе единой геоэлектрической и гидродинамической модели околоскважинного пространства. В дальнейшем необходимость дополнительного учета геомеханических свойств привела к развитию мультидисциплинарного подхода, использующего единую электрогидродинамическую и геомеханическую модель [Ельцов и др., 2014]. Кроме того, совместная инверсия данных индукционных и гальванических каротажных зондирований определяет возможность изучения различных эффектов распространения и взаимодействия электромагнитного поля со средой. А именно, становится возможным детальное изучение частотной дисперсии УЭС и электрической макроанизотропии горных пород, интерес к которым в последнее время значительный, в том числе из наклонных и горизонтальных скважин [Эпов и др., 2010; Nikitenko et al., 2016]. Их учет при интерпретации данных электрокаротажных зондирований приводит к необходимости использования специализированного программного обеспечения.

Для решения вычислительных задач электрокаротажа в рамках осесимметричной модели среды известны различные подходы. Рассматривались решения прямых задач численно-аналитическими и приближенными методами [Эпов, Никитенко, 1993; Tabarovsky, Rabinovich, 1998; Глинских и др., 2013а, б, 2014]. Они получили наиболее широкое распространение, поскольку позволяют разрабатывать быстрые алгоритмы обработки и инверсии данных. В связи с усложнением модельной базы электрокаротажных зондирований, а также стремительным развитием вычислительных методов для решения задач электродинамики предпочтение отдают сеточным методам. Основными из них для моделирования электромагнитных полей в неоднородных средах являются конечно-разностный и конечно-элементный методы [Эпов и др., 2007; Суродина, Эпов, 2012]. При этом широкое использование решений многомерных задач в полной постановке для обработки и интерпретации большого объема практических данных до сих пор сдерживалось их высокой ресурсоемкостью. Развитие же компьютерных информационных технологий и многопроцессорных вычислительных систем в настоящее время позволило существенно продвинуться в этом направлении. Становится возможным применение ресурсоемких вычислительных задач для практических целей обработки и интерпретации данных, что позволит суще-

ственно повысить точность определения геоэлектрических параметров и достоверность результатов интерпретации по данным комплекса методов скважинной электротометрии.

В статье представлены результаты разработки алгоритма совместной численной инверсии данных высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования (ВЭМКЗ) и бокового каротажного зондирования (БКЗ) в моделях геологических сред с осевой симметрией и результаты его применения на синтетических и практических данных. Следует отметить, что разработанный алгоритм может быть легко адаптирован для численной инверсии данных электрокаротажных приборов как с индукционным или гальваническим, так и смешанным индукционно-гальваническим типами возбуждения и измерения сигналов.

## РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА ИНВЕРСИИ И ОПИСАНИЕ ЕГО ОСНОВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Базовой интерпретационной моделью является двумерная осесимметричная геоэлектрическая модель среды, описывающая вскрытие горизонтально-слоистого разреза вертикальной скважиной, с формированием измененных прискважинных зон (рис. 1). Осесимметричная модель включает пачку слоев с плоскопараллельными горизонтальными границами, пересеченными вертикальной цилиндрической скважиной. В прискважинной области каждого из пластов может быть две зоны – проникновения и окаймляющая, а в некоторых случаях и еще одна – промытая. Они отделены друг от друга, от скважины и пласта коаксиально-цилиндрическими границами. Каждая из областей геоэлектрической модели среды характеризуется своими значениями УЭС.

Разработанный вычислительный алгоритм совместной инверсии базируется на алгоритмах численного моделирования данных индукционных и гальванических зондирований в средах с осевой симметрией, основанных на сеточном методе конечных разностей [Суродина, Эпов, 2012]. Численные решения прямых задач после дискретизации с использованием метода конечных разностей сводятся к системам линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с разреженными матрицами большой размерности, для эффективного решения которых применяются широко известные прямые и итерационные методы.

Основные особенности алгоритмов численного моделирования состоят в следующем. Численное двумерное моделирование данных гальванического каротажа сводится к решению уравнения Пуассона. С использованием консервативной разностной схемы задача сводится к СЛАУ, которая после симметризации эффективно решается методом сопряженных градиентов. В силу плохой обусловленности СЛАУ используется предобуславливание на основе алгоритма Хотеллинга [Labutin, Surodina, 2013]. Решение прямой двумерной задачи индукционных каротажных зондирований сводится к решению уравнения Гельмгольца. Для решения получаемой СЛАУ применяется итерационный метод СОСР [Sogabe, Zhang, 2007], также с предобуславливанием. Разработанные алгоритмы решения прямых задач тщательно верифицированы, протестированы и апробированы на большом объеме реалистичных геоэлектрических моделей.

Решение обратной задачи в двумерной постановке сводится к восстановлению пространственного распределения УЭС горных пород по наблюдаемым электрокаротажным откликам. В качестве стартовой модели эффективно используются результаты одномерной инверсии, полученные на основе цилиндрически-слоистой модели по данным комплекса методов или отдельно взятого метода. Численную инверсию предлагается проводить в два этапа. На первом, во всем интервале выделенного слоя, проводится одномерная инверсия с восстановлением радиального профиля УЭС от стенки скважины в глубь пласта, с предварительным определением положения горизонтальных границ ручным или автоматическим способом, основанным на анализе производных. На втором этапе выполняется уточнение распределения УЭС и положения границ пластов и цилиндрических зон в рамках двумерной модели.

Численная инверсия практических данных представляет собой минимизацию среднеквадратического отклонения измеренных данных от синтетических путем изменения модельных параметров по заданному алгоритму. Алгоритм численной инверсии основан на методе деформируемых многогранников. Он позволяет быстро выбрать правильное направление поиска и значительно уменьшить минимизируемую функцию уже на первых итерациях. В алгоритме инверсии можно использовать произвольные комбинации сигналов из полного набора измерений,

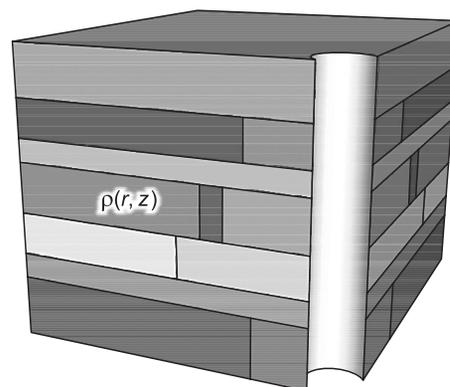


Рис. 1. Интерпретационная геоэлектрическая модель среды с осевой симметрией.

например, при их отсутствии или некондиционности. В инверсионной модели параметры можно фиксировать или задавать для них ограничения. Это позволяет уточнять значения отдельных параметров при необходимости повторной инверсии, а также сокращать количество подбираемых параметров в случае, когда исследуемый интервал содержит мощные однородные пласты, параметры которых уже определены с хорошей точностью с помощью одномерной инверсии.

### АПРОБИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИНВЕРСИИ НА ЗАШУМЛЕННЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА

Чтобы убедиться в надежности разработанного алгоритма численной инверсии, выполнен сравнительный анализ результатов двумерной и одномерной совместной инверсии зашумленных синтетических данных электрокаротажа, рассчитанных с использованием метода конечных разностей.

Рассматриваются реалистичные геоэлектрические модели терригенных нефтегазовых коллекторов Широкого Приобья Западной Сибири, осложненные маломощными прослоями глин и карбонатов и вскрытые скважинами на пресном буровом растворе (радиус 0.108 м, УЭС 2 Ом·м). Проницаемые интервалы включают зону проникновения, а также окаймляющую зону в нефтеводонасыщенных пластах с подвижной нефтью и водой [Антонов и др., 2012]. Характер проникновения фильтрата бурового раствора обусловлен изменением УЭС околоскважинного пространства, связанного с перераспределением минерализации пластовой воды и фильтрата.

Выполнен анализ сигналов пяти основных зондов ВЭМКЗ (DF05, DF07, DF10, DF14, DF20) и четырех зондов БКЗ (A0.4M0.1N, A1.0M0.1N, A2.0M0.5N, A4.0M0.5N). Синтетические диаграммы предварительно зашумлены с использованием нормально распределенной случайной величины, описываемой реальной моделью погрешностей измерений.

На рис. 2 а, б приведены результаты численной инверсии зашумленных синтетических диаграмм электрокаротажных зондирований в модели газонефтеводонасыщенного коллектора, перекрытого глинами и подстилаемого отложениями карбонатов. Коллектор осложнен маломощными (0.3 м) прослоями. Так, между газо- (2.0—3.5 м) и нефтенасыщенным (3.8—5.3 м) пластами находится глинистый пропласток (3.5—3.8 м), а между нефте- и водонасыщенной (5.6—7.1 м) частями — карбонатный (5.3—5.6 м), что является типичным для разрезов Западной Сибири. В проницаемом газонасыщенном пласте сформировалась понижающая зона проникновения, а в двух других — повышающие.

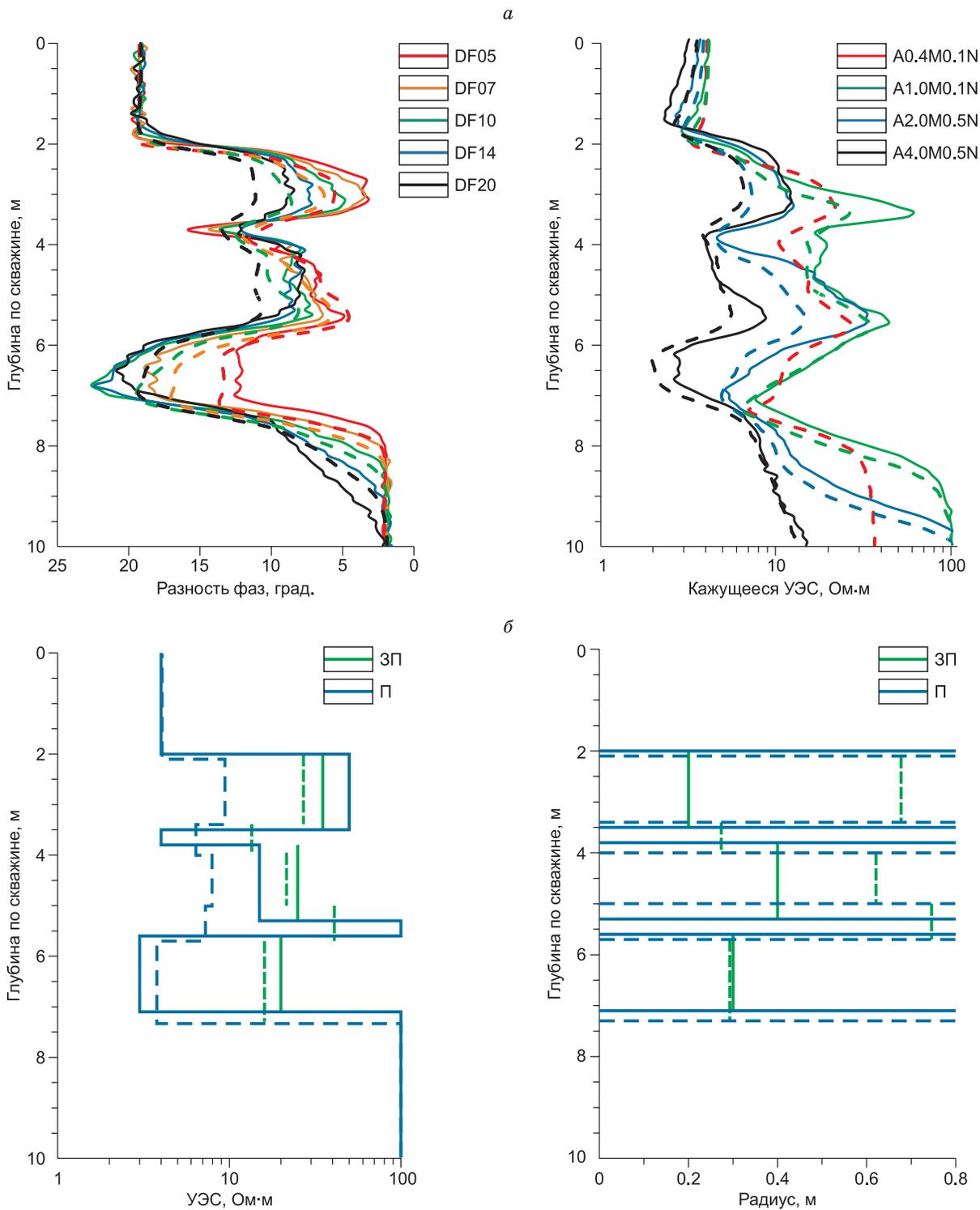
На рис. 2, а приведены синтетические диаграммы ВЭМКЗ (слева) и БКЗ (справа), рассчитанные с использованием двумерного моделирования. Здесь и далее сплошные линии соответствуют зашумленным сигналам в исходной модели, а штриховые — сигналам в модели, полученной по результатам одномерной инверсии в рамках цилиндрически-слоистой модели.

На рис. 2, б представлено распределение УЭС (слева) и цилиндрических и горизонтальных границ (справа) в рассматриваемой модели. Здесь и далее сплошные линии соответствуют исходной модели, штриховые — результатам одномерной инверсии.

Анализируя зашумленные диаграммы электрокаротажных зондирований, отметим следующее (см. рис. 2, а). Характер поведения диаграмм ВЭМКЗ и БКЗ существенно различен. Сигналы ВЭМКЗ характеризуются большей информативностью при визуальном анализе и лучшей степенью расчленения разреза. Глинистый прослой отчетливо выделяется по всем диаграммам ВЭМКЗ, в то время как по БКЗ обнаружить его наличие можно лишь по зондам A0.4M0.1N и A2.0M0.5N. Карбонатный прослой, напротив, проявляется на диаграммах всех зондов БКЗ. Что касается ВЭМКЗ, идентифицировать этот высокоомный объект в разрезе можно только предположительно, по данным короткого зонда DF05. Ниже высококонтрастной границы водоносного пласта и нижележащих карбонатных отложений выход диаграмм длинных зондов ВЭМКЗ на асимптотические значения происходит быстрее, чем зондов БКЗ. Это связано, в том числе, со значительным влиянием скважины на сигналы последних.

Перейдем к анализу результатов совместной одномерной инверсии данных ВЭМКЗ и БКЗ, полученных на первом этапе численной интерпретации (см. рис. 2, а, б). Обратим внимание, что восстановленные значения многих геоэлектрических параметров значительно отличаются от истинных. С применением алгоритма автоматической расстановки границ определены положения горизонтальных границ, изображенные в правой части рис. 2, б штриховой линией. Как видно, различия их координат и истинных достигают 0.3 м. Для лучшего совпадения исходных и подбираемых кривых зондирования в глинистом и карбонатном прослоях требовалось ввести зоны проникновения, отсутствующие в исходной модели. Полученное УЭС глинистого прослоя отличается от модельного в 1.6 раза, а карбонатного — в 14 раз. Что касается проницаемых пластов, наибольшие расхождения с исходной моделью наблюдаются на интервалах газо- и нефтенасыщенного коллекторов. В первом из них (2.0—3.5 м), с УЭС 50 Ом·м, подобранное УЭС составляет 9.4 Ом·м, что соответствует насыщению нефтью и водой. При этом вместо понижающего проникновения с радиусом зоны проникновения 0.2 м и УЭС 35 Ом·м, полу-

чено повышающее проникновение с широкой зоной (0.7 м, УЭС 27 Ом·м). Причина такого недостоверного результата – сильное влияние низкоомных глинистых отложений, находящихся над кровлей и под подошвой рассматриваемого пласта мощностью 1.5 м. В свою очередь, в нефтенасыщенном коллекторе (3.8-5.3 м) с УЭС 15 Ом·м по результатам одномерного подхода восстановленное УЭС равно 7.9 Ом·м;

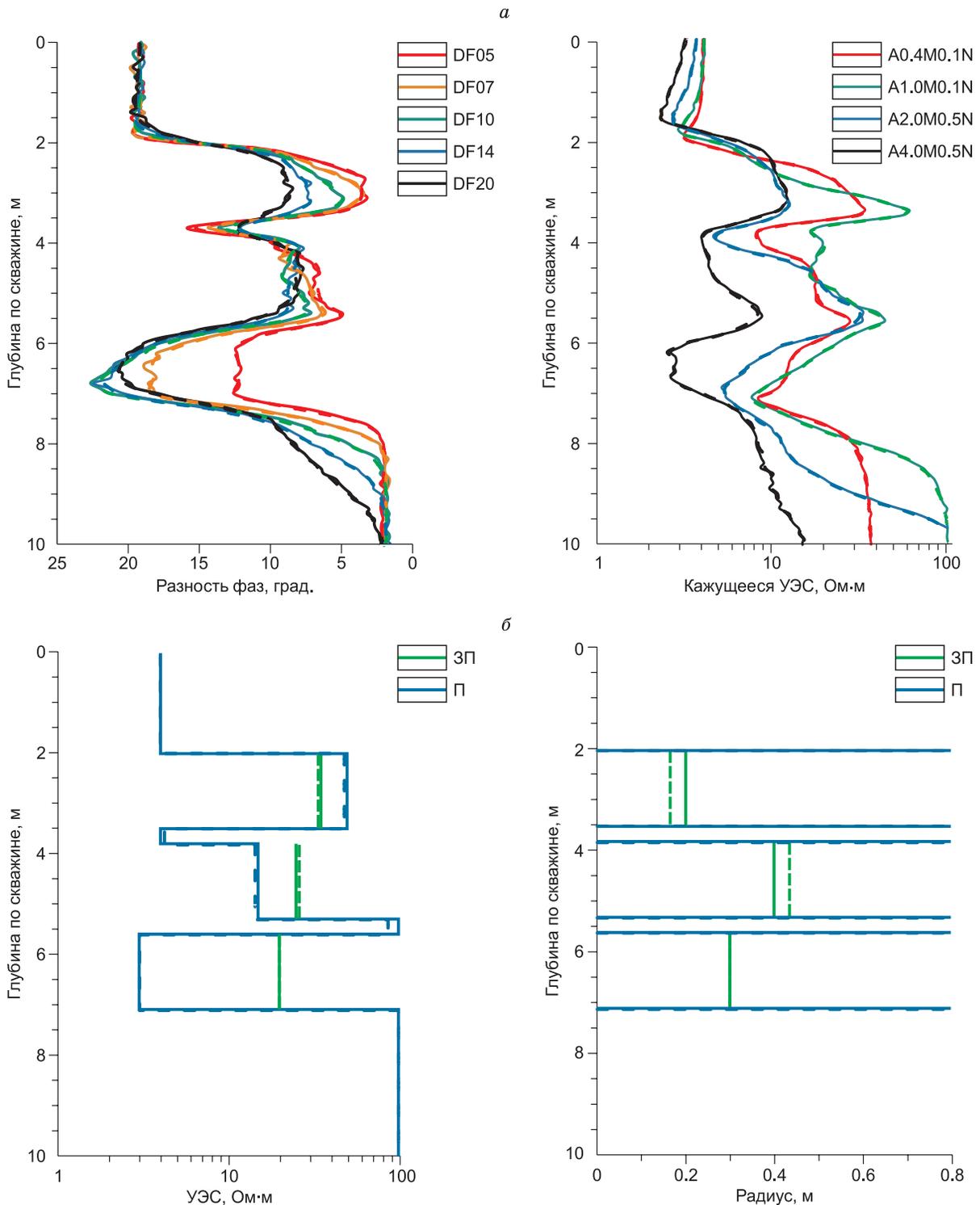


**Рис. 2. Синтетические диаграммы ВЭМКЗ и БКЗ (а) в модели газонефтеводонасыщенного коллектора с маломощными глинистым и карбонатным прослоями (б).**

Сплошные линии соответствуют исходной модели, штриховые — модели, полученной по результатам одномерной инверсии. Здесь и далее: П — пласт, ОЗ — окаймляющая зона, ЗП — зона проникновения, ПЗ — промытая зона.

радиус зоны проникновения отличается от истинного в 1.5 раза. В значительной степени это связано с большой контрастностью УЭС рассматриваемого коллектора и отложений, расположенных выше и ниже по разрезу.

На втором этапе проводилась совместная двумерная инверсия данных ВЭМКЗ и БКЗ (рис. 3, а, б). В качестве стартовой модели использовались результаты одномерной инверсии. УЭС вмещающих по-



**Рис. 3. Синтетические диаграммы ВЭМКЗ и БКЗ (а) в модели газонефтеводонасыщенного коллектора с маломощными глинистым и карбонатным прослоями (б).**

Сплошные линии соответствуют исходной модели, штриховые — модели, полученной по результатам совместной двумерной инверсии.

род были зафиксированы и далее не подбирались. Все остальные электрофизические и геометрические параметры разреза (УЭС пластов и измененных зон, положения радиальных и горизонтальных границ) уточнялись в ходе рассматриваемой двумерной инверсии. Отдельно отметим, что зоны проникновения в глинистом и карбонатном прослоях, не обеспечив удовлетворительного совпадения одноименных диаграмм, были исключены, при этом соответствующее им УЭС перераспределено с соседними пластами. В результате достигнуто высокое совпадение исходных и подобранных диаграмм, а также параметров среды. Среди электрофизических параметров наименее точно восстановлено УЭС карбонатного прослоя (погрешность 13 %), в то время как среди геометрических – радиусы зон проникновения в газо- и нефтенасыщенном пластах (соответствующие погрешности 15 и 10 %) в силу эквивалентности сигналов.

На рис. 4, *а, б* приведены результаты численной инверсии зашумленных синтетических диаграмм электрокаротажных зондирований в модели нефтеводонасыщенного коллектора, залегающего в аргиллитах и осложненного маломощным карбонатным прослоем. В рассматриваемой модели над подстилающими аргиллитами залегаёт водоносный пласт (5.3—6.8 м), выше которого по разрезу следует интервал, содержащий подвижные нефть и воду (3.8—5.3 м). Выше находится нефтенасыщенный пласт (2.0—3.5 м), отделенный от последнего маломощным (3.5—3.8 м) карбонатным прослоем и перекрываемый отложениями аргиллитов. Во всех проницаемых пластах сформировались повышающие зоны проникновения, а в нефтеводонасыщенном пласте при этом образовалась окаймляющая зона.

Анализ диаграмм показывает, что высокоомный карбонатный прослой отчетливо выделяется по диаграммам БКЗ, в то время как на сигналах ВЭМКЗ он практически не проявляется (см. рис. 4, *а*). Обратное верно для нефтеводонасыщенного интервала 3.8—5.3 м с окаймляющей зоной, к наличию которой у ВЭМКЗ высокая чувствительность.

По рис. 4, *б* можно увидеть, что результат одномерной совместной инверсии ВЭМКЗ и БКЗ недостаточно достоверен. В частности, в карбонатном прослоем введена ложная зона проникновения. При этом за исключением положения нижней горизонтальной границы, параметры зоны проникновения, окаймляющей зоны и неизменной части нефтеводонасыщенного пласта определены сравнительно хорошо.

В ходе совместной двумерной инверсии все параметры, за исключением фиксированных УЭС вмещающих аргиллитов, подобраны с высокой точностью, что показано на рис. 5, *а, б*. С наибольшей погрешностью восстановлено УЭС маломощного карбонатного прослоя (11.7 %), а также радиус зоны проникновения и УЭС неизменной части нефтенасыщенного пласта (4.5 %). Последнее объясняется низкой контрастностью УЭС в этом пласте.

Таким образом, на примерах зашумленных синтетических сигналов ВЭМКЗ и БКЗ в типичных моделях пластов-коллекторов показано, что разработанный алгоритм численной инверсии данных комплекса методов электрокаротажных зондирований позволяет получать согласованную геоэлектрическую модель, учитывающую двумерное распределение УЭС сложнопостроенных геологических сред, что повышает достоверность оценки их флюидонасыщения.

## СОВМЕСТНАЯ ЧИСЛЕННАЯ ИНВЕРСИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ПОСТРОЕНИЕМ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

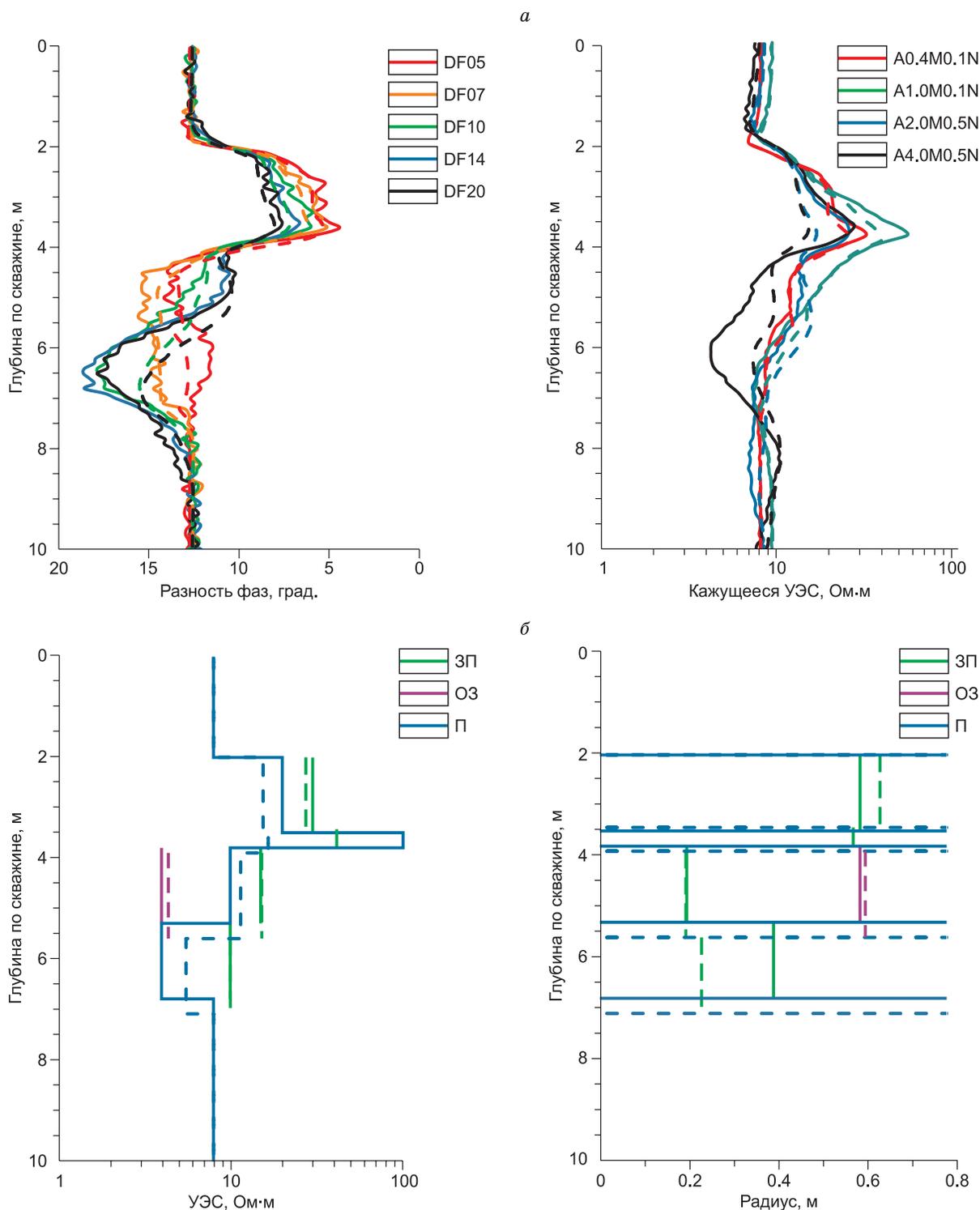
Алгоритм апробирован на практических диаграммах ВЭМКЗ и БКЗ из десятков скважин с различных месторождений Сургутского свода Широкого Приобья, где значительные скопления нефти приурочены к нижнемеловым (АС, БС) и юрским (ЮС) отложениям.

Рассмотрим пример с интервала пластов АС<sub>5,6</sub> Федоровского месторождения, являющегося одним из крупных многопластовых месторождений. Рассматриваемый разрез вскрыт скважиной на глинистом буровом растворе с УЭС 2.7 Ом·м. В ходе совместной двумерной инверсии практических данных ВЭМКЗ и БКЗ (рис. 6, *а*) получена реалистичная геоэлектрическая модель геологического разреза сложного строения (рис. 6, *б*). Выделяется нефтеводонасыщенный коллектор (38.0—53.7 м), осложненный высокоомным карбонатным прослоем (47.8—49.6 м). Коллектор перекрывается глинистыми отложениями и подстилается мощной водоносной залежью пластов АС<sub>7,8</sub> (55.3—80.0 м, на рисунке приведена верхняя часть), отделенной от последнего заглинизированным участком (53.7—55.3 м). Показания длинных зондов ВЭМКЗ в диапазоне глубин 41.0—47.8 м монотонно возрастают, что говорит об увеличении водоносности. В верхней части коллектора (38.7—45.8 м) выделяется окаймляющая зона, отражающая его насыщение подвижной нефтью и пластовой водой. Ниже, на глубинах 45.8—47.8 и 49.6—52.5 м, находятся водоносные участки коллектора.

При верификации результатов одномерной инверсии с помощью двумерного моделирования обеспечивается высокая степень совпадения практических и синтетических данных ВЭМКЗ и БКЗ на изучаемом интервале. В ходе совместной двумерной инверсии выполнено уточнение модельных пара-

метров. Установлено, что пространственное распределение УЭС, полученное при одномерном и двумерном подходах, значительно различается. Отмечено, что значения УЭС высококонтрастных пластов удовлетворительно подбираются, как правило, после предварительного уточнения положения горизонтальных границ.

В заключение обратимся к рис. 7, где представлены результаты применения алгоритма на практических данных ВЭМКЗ и БКЗ, записанных с помощью аппаратного комплекса СКЛ на Восточно-

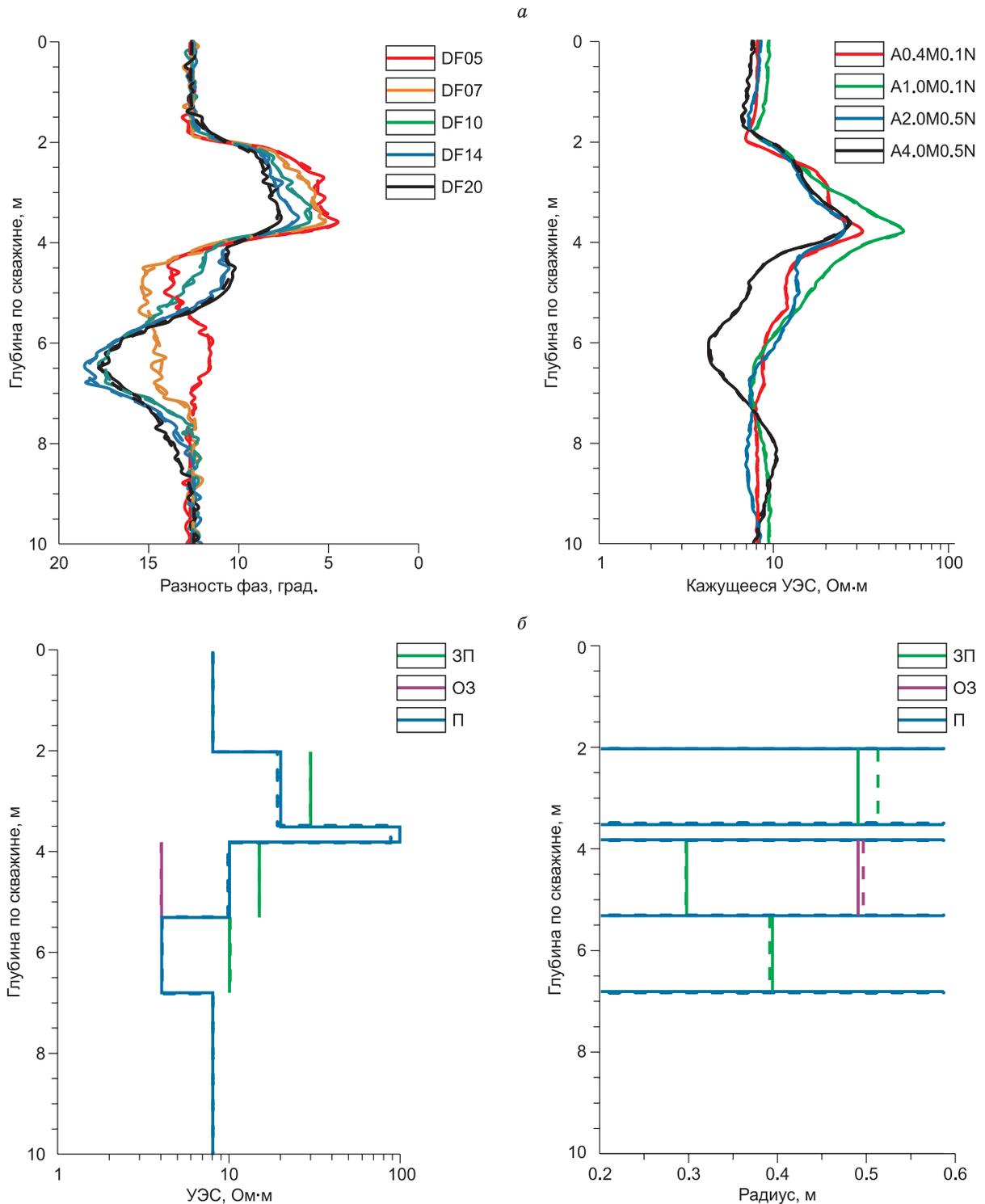


**Рис. 4. Синтетические диаграммы ВЭМКЗ и БКЗ (а) в модели нефтеводонасыщенного коллектора, залегающего в аргиллитах и осложненного мало мощным карбонатным прослоем (б).**

Сплошные линии соответствуют исходной модели, штриховые – модели, полученной по результатам одномерной инверсии.

Сургутском месторождении. Бурение скважины проводилось на глинистом буровом растворе (УЭС 2.8 Ом·м). Поскольку данные записаны высокоточной аппаратурой, предварительная фильтрация и сглаживание не потребовались.

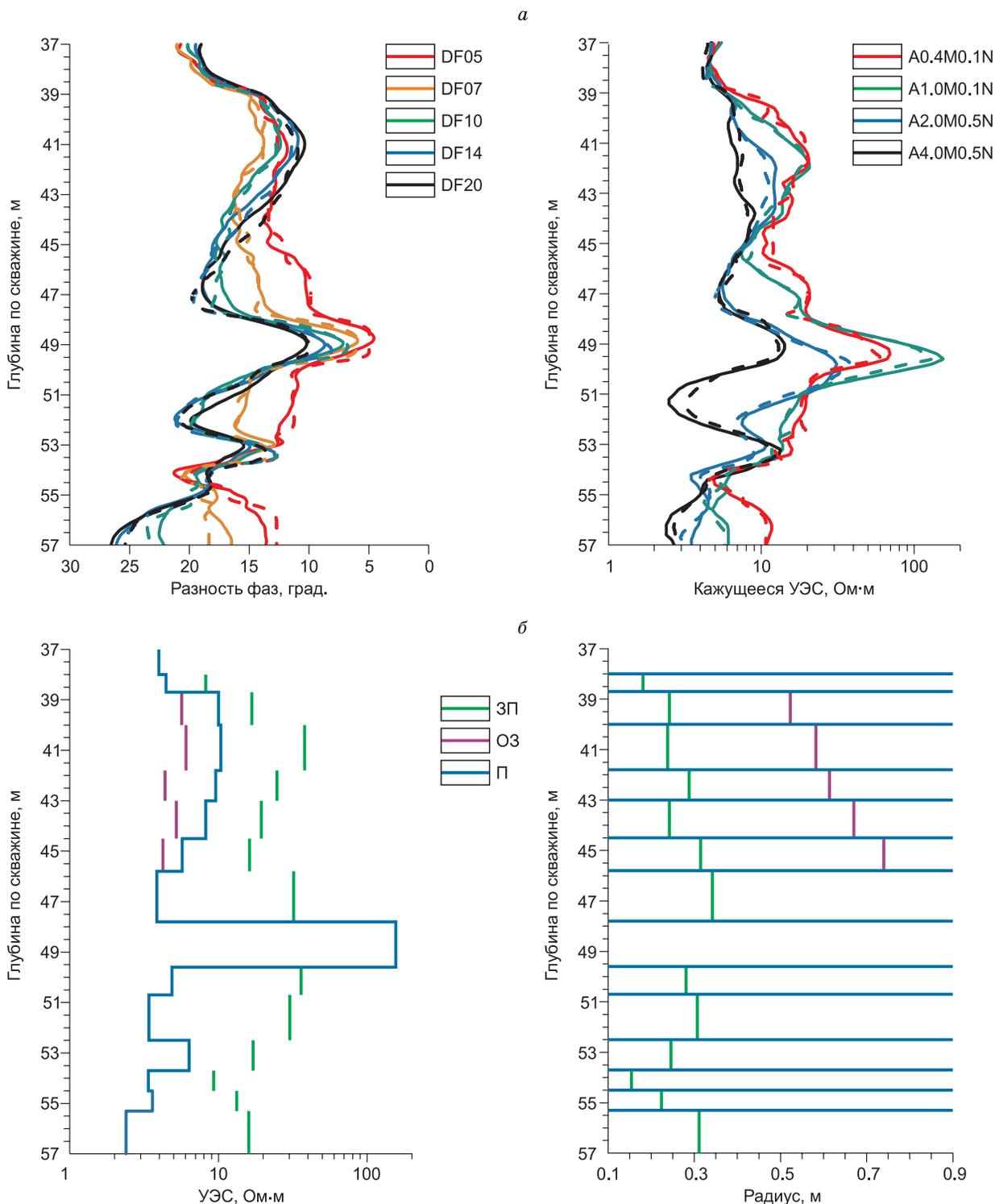
Рассматриваемый интервал (85.0—91.0 м, см. рис. 7, а) является среднеюрским песчаным горизонтом ЮС<sub>2</sub>, характеризующимся сложным геологическим строением. В частности, коллектор частично



**Рис. 5. Синтетические диаграммы ВЭМКЗ и БКЗ (а) в модели нефтеводонасыщенного коллектора, залегающего в аргиллитах и осложненного маломощным карбонатным прослоем (б).**

Сплошные линии соответствуют исходной модели, штриховые — модели, полученной по результатам совместной двумерной инверсии.

карбонатизирован, что особенно выражено на диаграммах в диапазонах глубин 86.3—87.0 и 89.5—90.0 м. В связи со значительной неоднородностью интервала по вертикали, его большая часть была разбита на пропластки мощностью около 0.5 м, инверсия которых выполнялась попластово. В результате совместной двумерной инверсии получена геоэлектрическая модель коллектора в аргиллитах, высокое УЭС которого соответствует нефтяному насыщению. В отличие от предыдущих примеров, на всех интервалах была по необходимости введена высокоомная промытая зона малого радиуса.

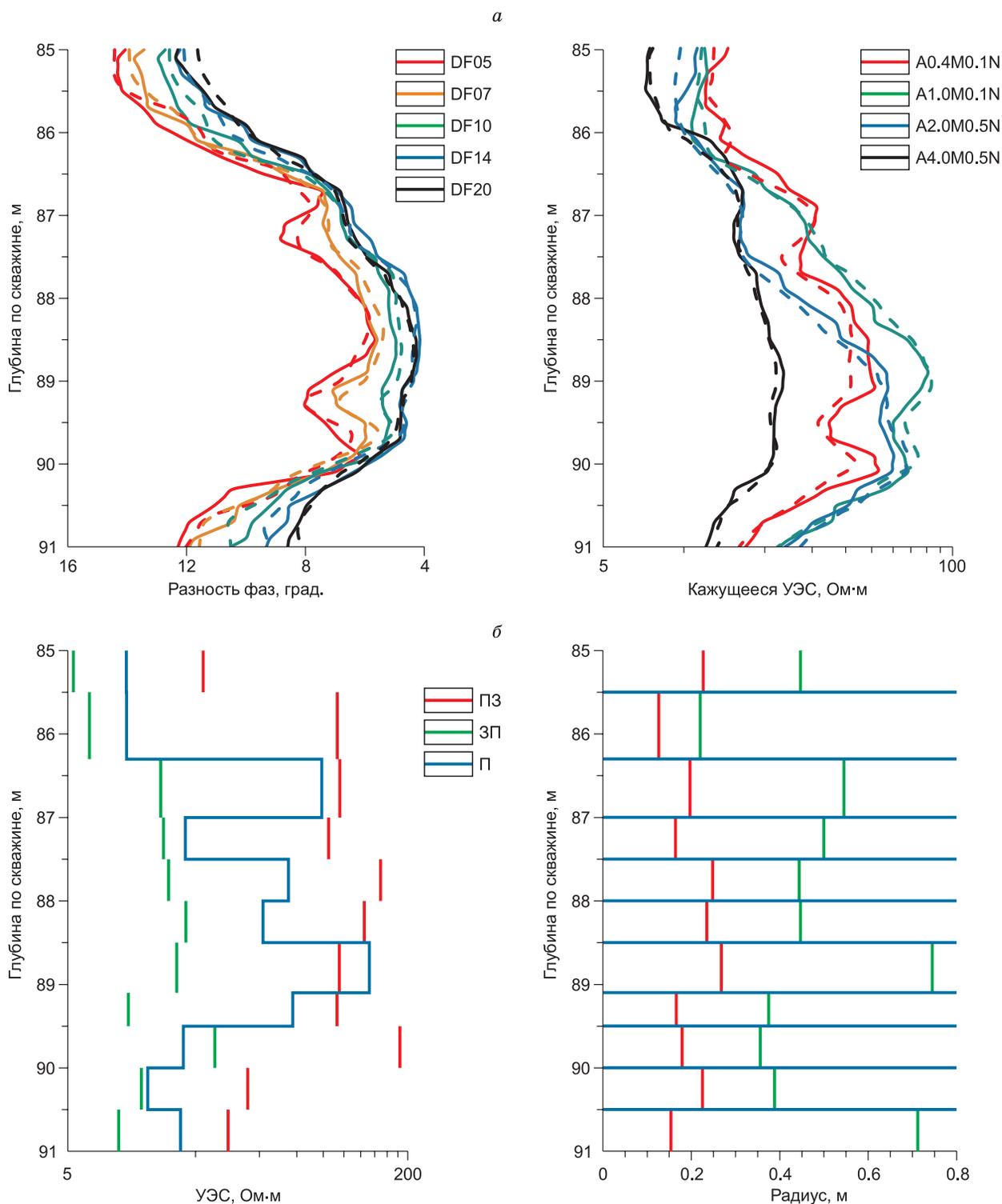


**Рис. 6.** Диаграммы ВЭМКЗ и БКЗ (*a*) и результат совместной двумерной инверсии (*б*) на интервале пластов АС<sub>5-6</sub> Федоровского месторождения.

Сплошные линии соответствуют практическим диаграммам, штриховые — синтетическим для подобранной модели.

Заметим, что несколько хуже подобрались диаграммы коротких зондов, прежде всего БКЗ, что может быть связано с образовавшимися кавернами, изменившими номинальный радиус скважины и осложнившими распределение УЭС непосредственно у стенки скважины.

Что касается производительности вычислений, использование последовательных алгоритмов решения прямой двумерной задачи достаточно ресурсоемко. В то же время графические процессоры по-



**Рис. 7.** Диаграммы ВЭМКЗ и БКЗ аппаратного комплекса СКЛ (*a*) и результат совместной двумерной инверсии (*б*) на интервале пласта ЮС<sub>2</sub> Восточно-Сургутского месторождения.

Сплошные линии соответствуют практическим диаграммам, штриховые — синтетическим для подобранной модели.

звolyют повысить быстродействие в десятки раз, обеспечивая возможность двумерной инверсии в режиме времени, близком к реальному.

Таким образом, примерами численной интерпретации практических диаграмм ВЭМКЗ и БКЗ из интервалов нижнемеловых и среднеюрских отложений Федоровского и Восточно-Сургутского месторождений продемонстрирована возможность получения согласованной геоэлектрической модели коллекторов углеводородов сложного строения по данным комплекса методов электрокаротажных зондирований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения достоверности определения геоэлектрических параметров сложнопостроенных флюидонасыщенных геологических сред используется комплексирование методов индукционных и гальванических каротажных зондирований в рамках единой согласованной интерпретационной модели. Разработан и программно реализован вычислительный алгоритм совместной двумерной численной инверсии данных электрокаротажных зондирований. Алгоритм базируется на численных решениях прямых задач с использованием метода конечных разностей и нелинейной минимизации на основе метода деформируемых многогранников. Применяется поэтапная схема численной инверсии, в которой определение геоэлектрических параметров выполняется в слоисто-однородной и двумерной моделях. Алгоритм протестирован как на зашумленных синтетических, так и на практических данных ВЭМКЗ и БКЗ из скважин Федоровского и Восточно-Сургутского месторождений Широкого Приобья, в том числе записанных аппаратурным комплексом СКЛ. Показано, что алгоритм обеспечивает повышение точности результатов интерпретации диаграмм электрокаротажных зондирований по сравнению с широко используемым подходом в рамках одномерной модели. Разработанный алгоритм может быть легко адаптирован для численной интерпретации данных других электрокаротажных приборов с индукционным, гальваническим и смешанным индукционно-гальваническим типами возбуждения сигналов.

Работа выполнена при поддержке правительства Новосибирской области.

## ЛИТЕРАТУРА

**Антонов Ю.Н., Сметанина Л.В., Михайлов И.В.** Окаймляющая зона как признак подвижной нефти в терригенных коллекторах // Каротажник, 2012, вып. 216, № 6, с. 16–40.

**Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Эпов М.И.** Моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в пластах конечной мощности, вскрытых на биополимерных и нефтяных буровых растворах // Геология и геофизика, 2013а, т. 54 (11), с. 1803–1813.

**Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Эпов М.И.** Линеаризованные решения прямых и обратных двумерных задач высокочастотного электромагнитного каротажа в проводящих средах с учетом токов смещения // Геология и геофизика, 2013б, т. 54 (12), с. 1942–1951.

**Глинских В.Н., Нестерова Г.В., Эпов М.И.** Моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа с использованием петрофизических моделей электропроводности // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (5–6), с. 1001–1010.

**Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Эпов М.И.** Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбуриваемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (5–6), с. 978–990.

**Каюров К.Н., Еремин В.Н., Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н.** Аппаратура и интерпретационная база электромагнитного каротажа в процессе бурения // Нефтяное хозяйство, 2014, № 12, с. 112–115.

**Кнеллер Л.Е., Потапов А.П.** Автоматизированное определение удельного электрического сопротивления в тонкослоистом разрезе по комплексу зондов электрокаротажа // Прикладная геофизика, 1992, вып. 127, с. 116–127.

**Михайлов И.В., Глинских В.Н.** Особенности сигналов ВИКИЗ и их численная инверсия в окрестности границ «глина—песчаник» // Каротажник, 2015, вып. 1, № 247, с. 24–34.

**Суродина И.В., Эпов М.И.** Влияние биополимерных буровых растворов на диаграммы высокочастотного электромагнитного каротажа // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (8), с. 1062–1069.

**Эпов М.И., Никитенко М.Н.** Система одномерной интерпретации данных высокочастотных индукционных каротажных зондирований // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (2), с. 124–130.

**Эпов М.И., Шурина Э.П., Нечаев О.В.** Прямое трехмерное моделирование векторного поля для задач электромагнитного каротажа // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (9), с. 989–995.

**Эпов М.И., Каюров К.Н., Ельцов И.Н., Сухорукова К.В., Петров А.Н., Соболев А.Ю., Власов А.А.** Новый аппаратурный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro // Бурение и нефть, 2010, № 2, с. 16–19.

**Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Павлова М.А.** Интерпретация данных электрокаротажных зондирований в неокомских пластах-коллекторах Широкого Приобья // Геология нефти и газа, 2013, № 3, с. 21—28.

**Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Еремин В.Н.** Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовых скважин // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (8), с. 1520—1529.

**Labutin I.B., Surodina I.V.** Algorithm for sparse approximate inverse preconditioners in the conjugate gradient method // Reliable Computing, 2013, v. 19, p. 120—126 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/volume-19/reliable-computing-19-pp-120-126.pdf>.

**Mezzatesta A.G., Payton C.C., Strack K.M., Tabarovskiy L.A.** Simultaneous inversion of galvanic and induction logging measurements to improve resolution // Proceedings of the SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference (Buenos Aires, Argentina, 27-29 April 1994). 1994, Paper SPE 26976, <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-26976-MS>.

**Nikitenko M.N., Surodina I.V., Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Suhorukova C.V.** Formation evaluation via 2D processing of induction and galvanic logging data using high-performance computing // Extended abstracts of the 77th EAGE Conference & Exhibition (Madrid, Spain, 1-4 June 2015). 2015, Paper Tu № 107 15, <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.201412646>.

**Nikitenko M.N., Suhorukova C.V., Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Surodina I.V.** Effective inversion of electromagnetic and electric logging data from vertical and horizontal oil and gas wells // Extended abstracts of the 78th EAGE Conference & Exhibition (Vienna, Austria, 30 May-2 June 2016). 2016, Paper Tu STZ2 09, <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.201600893>.

**Rabinovich M., Tabarovskiy L.** Enhanced anisotropy from joint processing of multicomponent and multi-array induction tools // Transactions of the SPWLA 42nd Annual Logging Symposium (Houston, Texas, United States, 17–20 June 2001). 2001, Paper HH, <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2001-HH>.

**Shanjun L., Richard C.L., Navarro D., Changxi L., Cancan Z.** Joint inversion of SP and dual laterlog/dual induction data in 2D formation // Transactions of the SPWLA 48th Annual Logging Symposium (Austin, Texas, United States, 3–6 June 2007). 2007, Paper ZZ, <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2007-ZZ>.

**Sogabe T., Zhang S.** A COCR method for solving complex symmetric linear systems // J. Comput. Appl. Mathem., 2007, v. 199, p. 297—303.

**Tabarovskiy L.A., Rabinovich M.B.** Real time 2D inversion of induction logging data // J. Appl. Geophys., 1998, v. 38, № 4, p. 251—275.

**Yang W.** Determining resistivity anisotropy by joint lateral and induction logs // Transactions of the SPWLA 42nd Annual Logging Symposium (Houston, Texas, United States, 17–20 June 2001). 2001, Paper CC, <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2001-CC>.

*Рекомендована к печати 1 сентября 2016 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию  
15 марта 2016 г.*