



УДК 550.832.05:552(571.1)

НОВЫЙ ПОДХОД К ЛИТОЛОГО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ В ИНТЕРВАЛАХ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

В. Н. Глинских, А. А. Федосеев

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

Статья посвящена развитию комплексной литолого-электрофизической интерпретации данных электромагнитных зондирований для определения вещественного состава, выделения литологических типов и изучения электрофизических параметров пород баженовской свиты и ее стратиграфических аналогов в центральных районах Западной Сибири. По данным высокочастотных электромагнитных каротажных зондирований установлены частотные зависимости удельной электропроводимости и относительной диэлектрической проницаемости пород. С их использованием впервые построены комплексные литолого-электрофизические модели и изучены основные закономерности влияния породообразующих компонентов (глинистого, карбонатного, кремнистого материала, органического вещества и пирита) на дисперсионные свойства баженигов. На основе предложенного нового подхода к оценке содержания породообразующих компонентов по данным электромагнитных зондирований выделены основные литологические типы пород баженовской свиты в соответствии с современной классификацией. Построены литолого-электрофизические модели отложений баженовской свиты с привлечением значительных объемов эмпирических данных.

Ключевые слова: баженовская свита, породообразующие компоненты, электромагнитные зондирования, электрофизические параметры, частотная дисперсия, литолого-электрофизические модели.

A NEW APPROACH TO LITHO-ELECTROPHYSICAL INTERPRETATION OF ELECTROMAGNETIC SOUNDING DATA IN THE BAZHENOVSKAYA FORMATION INTERVALS

V. N. Glinskikh, A. A. Fedoseev

A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The work is devoted to the development of a comprehensive lithological and electrophysical interpretation of electromagnetic sounding data to determine the material composition, distinguish lithological types and study electrophysical parameters of the Bazhenovskaya Formation rocks and its stratigraphic analogues in the central regions of West Siberia. According to high-frequency electromagnetic log soundings, the frequency dependences of the specific conductivity and relative dielectric permeability of the Bazhenovskaya Formation rocks are established. Using them, complex lithological-electrophysical models have been first constructed, and the basic laws of the influence of rock-forming components (clay, carbonate, siliceous material, organic matter and pyrite) on the dispersion properties of bazhenites have been studied. Based on the proposed new approach to assessing the content of rock-forming components according to electromagnetic soundings, the main lithological types of the Bazhenovskaya Formation rocks are identified as on the modern classification. Lithological and electrophysical models of the Bazhenovskaya Formation deposits are constructed invoking significant amounts of empirical data.

Keywords: Bazhenovskaya Formation, rock-forming components, electromagnetic sounding, electrophysical parameters, frequency dispersion, lithological-electrophysical models.

DOI 10.20403/2078-0575-2019-4-80-88

На протяжении последних десятилетий огромный интерес ученых направлен на всестороннее изучение нетрадиционного источника углеводородного сырья в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции – баженовскую свиту. Она является как основной нефтепроизводящей толщей, так и региональным глинистым флюидоупором для залежей в отложениях оксфорда (верхняя юра). Отличительной особенностью служит высокая степень неоднородности минералогического состава, обусловленная пространственным изменением содержания в разрезе свиты глинистых, кремнистых, карбонатных породообразующих компонентов и органиче-

ского вещества. В связи с тем что разрезы скважин недостаточно охарактеризованы ядерным материалом, необходимо уделять большое внимание развитию методического обеспечения литологической интерпретации данных геофизических исследований в скважинах (ГИС), которая дает возможность оценивать относительное содержание породообразующих компонентов и выделять основные литологические типы баженовских отложений и их стратиграфических аналогов с целью выявления особенностей распределения пород в разрезах и закономерностей изменения по площади. Однако до сих пор не существует общей теоретико-методической



базы для комплексной обработки и интерпретации данных ГИС в интервалах свиты, что и определяет актуальность настоящего исследования.

Большинство разрезов скважин, вскрывших баженовскую свиту, охарактеризованы стандартным комплексом методов ГИС, а иногда и ограниченным. За последние годы произошло существенное развитие скважинной геофизической аппаратуры, появились новые приборы, обладающие высокой точностью измерений при синхронном каротаже на кабеле и бурильных трубах. Одними из современных программно-аппаратурных комплексов для изучения геологических разрезов сложного строения являются комплексы СКЛ (серия инновационных скважинных комплексов НПП ГА «Луч», Новосибирск), которые предназначены для каротажа в открытом стволе скважин. Они спроектированы таким образом, что при минимальной их длине в состав включен расширенный набор методов ГИС: гальванические методы электрометрии – потенциал самополяризации, боковой каротаж, боковое каротажное зондирование; индукционные методы электрометрии – высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ) и его расширенная модификация (ВЭМКЗ); низкочастотный индукционный каротаж; ядерные методы – гамма-каротаж, гамма-гамма-каротаж плотностной, нейтрон-нейтронный каротаж по тепловым нейтронам; термометрия, резистивиметрия, инклинометрия. Выполнение измерений за одну спускоподъемную операцию делает возможным проведение совместной инверсии комплекса данных ГИС с построением единой интерпретационной модели.

Применение комплекса гальванических и индукционных методов электрометрии существенно повышает эффективность и достоверность результатов интерпретации в сложных геологических разрезах. Используется избыточный набор измеряемых характеристик, что устраняет неоднозначность интерпретации в областях с высоким электрическим контрастом, к которым относятся отложения баженовской свиты. Наряду с этим открываются новые возможности совместной оценки как удельной электропроводности, так и относительной диэлектрической проницаемости пород, что до сих пор считается практически неразрешимой задачей. Принципиально важно, что становится возможным исследование таких слабоизученных эффектов, как электрическая анизотропия и частотная дисперсия электрофизических параметров. В связи со сложным вещественным составом, пространственно неоднородным распределением глинистых, кремнистых, карбонатных компонентов, органического вещества и рассеянного пирита, имеющих широкий диапазон значений электрофизических параметров и определяющих сложную микро- и макроструктуру пород баженовской свиты, в теории электромагнетизма не существует единого математически обо-

снованного подхода к изучению данных эффектов. Анализ научных публикаций и имеющийся опыт указывает на высокий интерес к установлению зависимостей электромагнитных свойств горных пород на основе скважинных измерений, лабораторных исследований на образцах керна и математического моделирования.

В рамках статьи выполнено построение реалистичных литолого-электрофизических моделей баженовских отложений с учетом результатов экспериментального изучения карбонатно-кремнисто-глинистых высокоуглеродистых отложений по промысловым данным, составляющих базу для обоснования новых методов электромагнитных зондирований при изучении уникальной черносланцевой свиты.

Модели относительного содержания породообразующих компонентов и основные литологические типы пород баженовской свиты по данным ГИС и керна

Литологическая интерпретация данных ГИС состоит в создании модели относительного содержания породообразующих компонентов с выделением основных литологических типов. Для построения литологической модели геологических объектов, имеющих сложный минеральный состав, используются различные способы. Один из них, получивший наиболее широкое практическое применение, связан с расчетом объемного содержания породообразующих компонентов по комплексу данных ГИС и керна. Способ основан на решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), связывающей сигналы методов ГИС и объемное содержание породообразующих компонентов [5, 11, 17, 18]:

$$f_i = \sum_{j=1}^m e_{ij} V_j, \quad i=1, \dots, n.$$

Здесь f_i – значения сигналов i -го метода ГИС, линейно связанные с объемным содержанием каждой из слагающих его породообразующих компонентов; e_{ij} – теоретические значения i -го параметра для j -й компоненты; V_j – объемное содержание j -й компоненты; m – число объемных компонентов; n – число используемых методов ГИС.

Объемная модель горной породы баженовской свиты в целом может быть представлена совокупностью таких компонентов, как глинистый, кремнистый, карбонатный материал, органическое вещество (ОВ) и пирит. Как правило, для численной инверсии используется расширенный набор данных ГИС, а также привлекается априорная информация о составе изучаемых пород по результатам минералогического анализа керна. В работе коэффициенты матрицы СЛАУ определяются с помощью метода сингулярного разложения матрицы, состоящей из данных ГИС и результатов изучения образцов керна.

Выделение основных литологических типов пород баженовской свиты выполняется с использо-

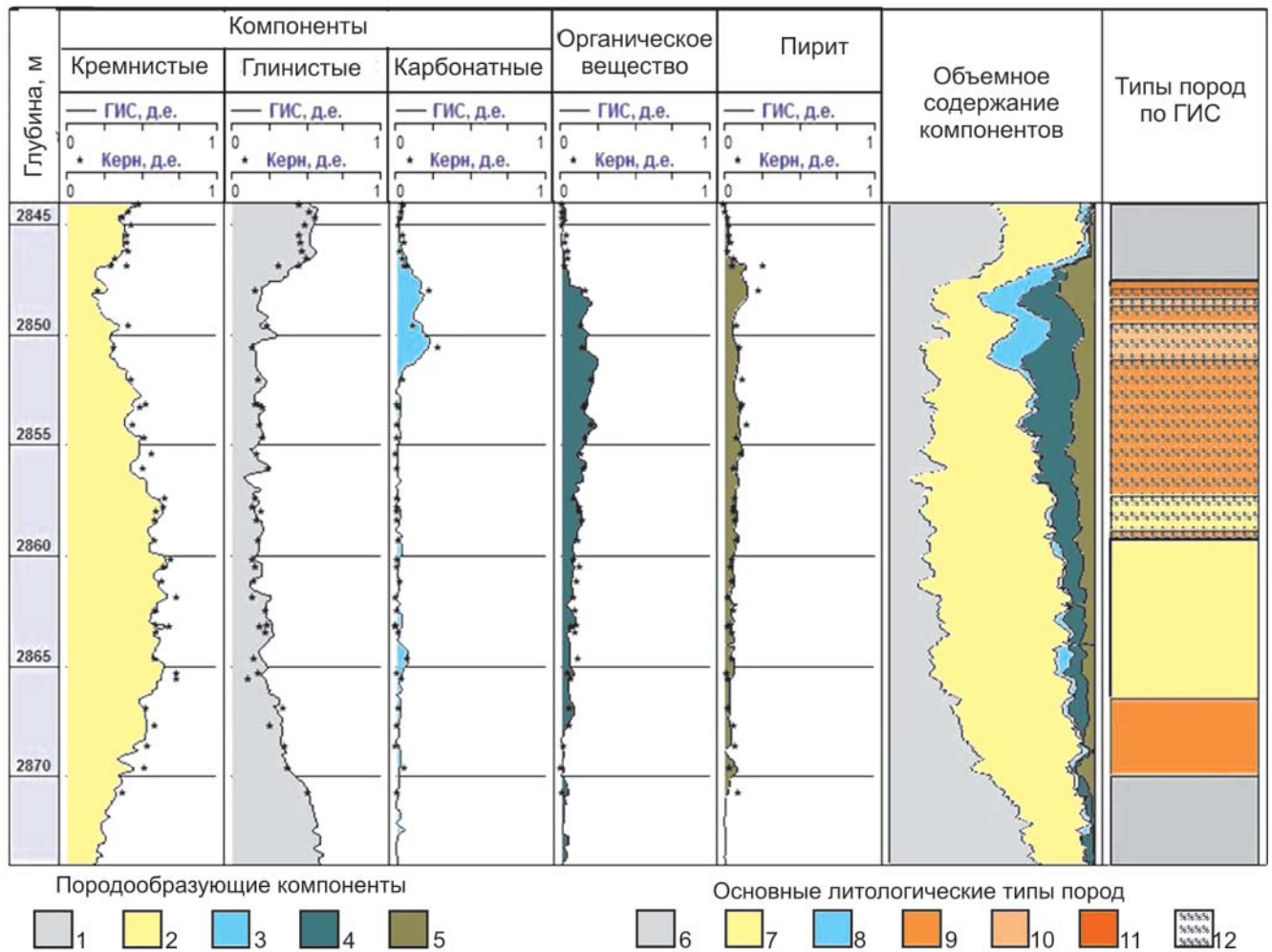


Рис. 1. Распределение относительного содержания породообразующих компонентов пород баженовской свиты, объемная модель и основные литологические типы

Породообразующие компоненты: 1 – кремнистые, 2 – глинистые, 3 – карбонатные, 4 – ОВ, 5 – пирит; основные литологические типы пород: 6 – аргиллиты, 7 – силициты, 8 – карбонаты, микститы, 9 – глинисто-кремнистые, 10 – карбонатно-кремнистые, 11 – карбонатно-глинистые; 12 – высокоуглеродистые породы

ванием новой классификации, предложенной в работе [4]. В ее основу положен принцип разделения пород баженовской свиты по составу основных групп минералов и минералоидов. В этой работе выделены четыре основных класса пород: аргиллиты, силициты, карбонаты и микститы, а также их подклассы, включая высоко- и низкоуглеродистые. По [9], аргиллиты в основном встречаются в верхней части баженовской свиты и образуют пласты толщиной от первых до двух десятков метров. Породы содержат параллельно ориентированные углеродистые линзы и включения пирита (относительное содержание ОВ 0,5–3 %, пирита 1,5–10 %). Силициты встречаются в виде слоев толщиной от 10 см до 10 м и приурочены к средней и нижней частям свиты. Имеют выраженное напластование и большое количество органогенного детрита и пирита (относительное содержание ОВ 8–16 %, пирита 4–7 %). Группа карбонатов объединяет породы с содержанием карбонатных минералов (преимущественно кальцита) не меньше 50 %. Микститы – это карбонатно-кремнисто-глинистые породы

смешанного состава, имеющие тонко-линзовидно-слоистое строение, которое обусловлено чередованием прослоев с углеродистыми линзами, кремнистых радиолярий и глинисто-кремнистых линзочек углеродистого состава (относительное содержание ОВ 10–20 %) [6]. В настоящем исследовании при построении литологической модели выполнялось определение основных литологических типов пород баженовской свиты в рамках сокращенной классификации [7].

По данным ГИС построены модели относительного содержания породообразующих компонентов и выделены основные литологические типы пород баженовской свиты и ее стратиграфических аналогов в разрезах более 60 скважин, пробуренных на Среднеазымской, Галяновской, Горшковской, Салымской, Восточно-Правдинской, Малобалыкской, Чупальской, Восточно-Сургутской, Федоровской, Рускинской, Дружной, Горстовой, Южно-Ягунской, Межовской, Ракитинской, Повховской и Тайлаковской площадях в центральной части Западно-Сибирского осадочного бассейна.

На рис. 1 представлена литологическая модель интервала баженовской свиты на примере одной из скважин Дружной площади. На треках «Компоненты», «Органическое вещество» и «Пирит» приведены относительные содержания породообразующих компонентов, полученных в результате численной инверсии. Как видно, результаты хорошо коррелируются с данными по керну как для кремнистого, глинистого, карбонатного материала, так и для ОВ и пирита (значения достоверности аппроксимации составляют 0,82–0,91). На последних треках («Объемное содержание компонентов» и «Типы пород по ГИС») показана модель объемного содержания породообразующих компонентов и выделенные по ней основные литологические типы пород баженовской свиты в соответствии с принятой в [4, 7] классификацией.

По полученным результатам баженовская свита в представленном разрезе (инт. 2847,3–2870 м) имеет поликомпонентный состав и содержит различные отложения. Она подстилается аргиллитами георгиевской свиты (глубина 2870 м) и перекрывается аргиллитами подачимовской толщи (глубина 2847,3 м). В основании баженовской свиты отмечается довольно большое количество глинистого материала (более 50 %). Выше по разрезу наблюдается увеличение содержания кремнистой породообразующей компоненты, что подтверждается наличием глинисто-кремнистых смешанных пород по керну (инт. 2867–2870 м), в инт. 2857,5–2867 м ее содержание превышает 50 %, что указывает на наличие силицитов. С глубины 2857,5 м и выше, где разрез сложен глинисто-кремнистыми породами, возрастает количество глинистого материала и ОВ. Повышение содержания карбонатного материала выше по разрезу (инт. 2847,3–2851 м) свидетельствует о наличии карбонатно-кремнистых и карбонатно-глинистых микститов. Концентрация ОВ в инт. 2848–2859 м изменяется в диапазоне от 10 до 22 %, что указывает на высокоуглеродистые смешанные породы в верхней части разреза. На всем интервале баженовской свиты наблюдается корреляция между ОВ и пиритом.

Частотные зависимости удельной электропроводности и относительной диэлектрической проницаемости по данным ВЭМКЗ

Развитие интерпретационной базы скважинной электрометрии связано с вовлечением математического аппарата, учитывающего и сложную геометрическую структуру, и различные эффекты взаимодействия и распространения электромагнитного поля. В последние годы актуальной задачей становится численная интерпретация данных электрометрии в геологических средах, описываемых полным набором электрофизических параметров – удельной электропроводностью (УЭП) и относительной диэлектрической проницаемостью (ОДП) [2, 3]. При этом особое внимание уделяется изучению их дисперсионных свойств [1].

По результатам обработки данных электромагнитных зондирований установлен выраженный эффект частотной дисперсии электрофизических параметров отложений баженовской свиты [8]. Частотная дисперсия в них обусловлена поляризацией рассеянного пирита и возникновением двойных электрических слоев на поверхностях глинистых минералов. Эти механизмы оказывают различное влияние на электромагнитные сигналы, поэтому могут составить основу нового подхода к литологической интерпретации на основе выявленных частотных зависимостей УЭП и ОДП. Установление дисперсионных свойств карбонатно-кремнисто-глинистых высокоуглеродистых пород баженовской свиты открывает новые возможности определения относительного содержания породообразующих компонентов, включая ОВ и пирит, по данным электромагнитных зондирований.

В настоящее время для изучения электрофизических свойств баженовской свиты используются данные измерений ВЭМКЗ, с помощью которых можно устанавливать частотные зависимости УЭП и ОДП на основе совместной численной инверсии измеряемых разности фаз и отношения амплитуд [2, 8]. Применение алгоритмов совместной численной инверсии относительных амплитудно-фазовых измерений повышает достоверность определения пространственного распределения электрофизических характеристик горных пород.

По данным ВЭМКЗ комплекса СКЛ в разрезе более трех десятков скважин на Русскинской, Федоровской, Восточно-Сургутской и Тайлаковской площадях установлены и детально изучены частотные зависимости УЭП и ОДП основных литологических типов пород баженовской свиты с привлечением результатов лабораторных измерений на керне.

На рис. 2 представлены характерные частотные зависимости УЭП и ОДП для шести литологических типов пород баженовской свиты в разрезе одной из скважин Восточно-Сургутской площади. По изученным зависимостям $\sigma(f)$ и $\epsilon(f)$ отмечено, что дисперсия электрофизических параметров наблюдается во всех породах баженовской свиты (силицитах, аргиллитах, карбонатах, глинисто-кремнистых микститах, карбонатно-кремнистых микститах, карбонатно-глинистых микститах, а также в породах с повышенным (>10 %) и пониженным (<10 %) содержанием ОВ). Различные породообразующие компоненты и их соотношения оказывают разное влияние на УЭП и ОДП в диапазоне частот ВЭМКЗ (0,875–14 МГц). Отмечено, что частотная дисперсия электрофизических параметров зависит не только от количества, но и от типа глинистых минералов, а также относительного содержания ОВ и пирита.

Выполнен сопоставительный анализ частотно зависимых УЭП и ОДП по данным ГИС и керна для интервалов и образцов с близкими значениями относительного содержания породообразующих компонентов. На рис. 3 показаны частотные спектры,

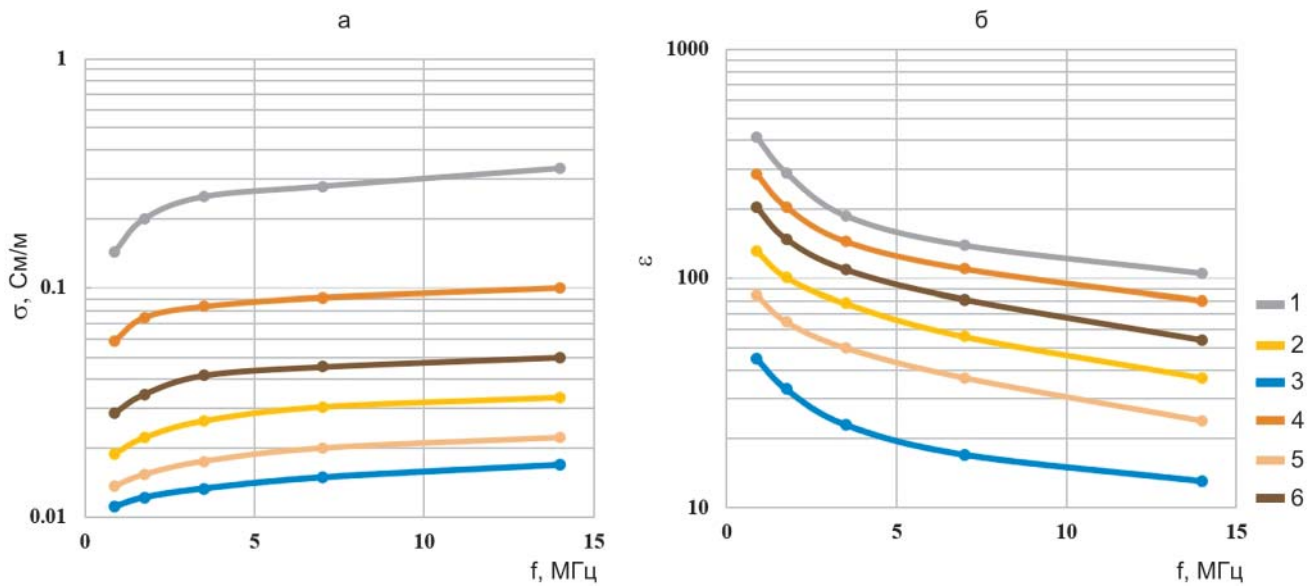


Рис. 2. Частотные зависимости УЭП (а) и ОДП (б) для основных литологических типов пород баженовской свиты 1 – аргиллиты; 2 – силициты; 3 – карбонаты; микститы; 4 – глинисто-кремнистые, 5 – карбонатно-кремнистые, 6 – карбонатно-глинистые

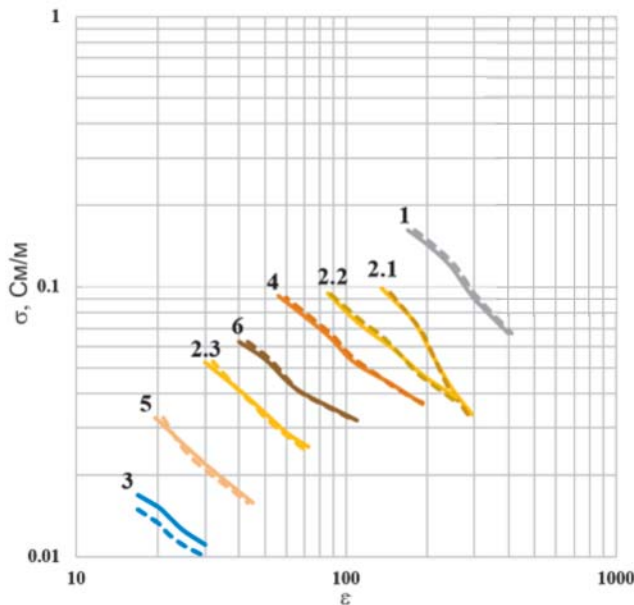


Рис. 3. Частотные зависимости УЭП и ОДП по данным ГИС (сплошная линия) и керну (пунктир)
Усл. обозн. см на рис. 2

характерные для аргиллитов, силицитов и микститов, включая высокоуглеродистые и пиритизированные. Так, различие частотных зависимостей УЭП и ОДП для образцов силицитов, имеющих близкое содержание кремнистых минералов, обусловлено содержанием пирита в образцах 2.1 и 2.2 более 7 %, а в образце 2.3 – менее 1 %. Расхождение графиков для карбонатов по ГИС и керну связано с малой мощностью карбонатизированных прослоев, недостаточной для пространственного разрешения. Отмечено, что для высокоуглеродистых пород баженовской свиты значения диапазонов частотных зависимостей значительно ниже, чем для низкоуглеродистых.

Таким образом, глинистые минералы, ОВ и пирит в породе оказывают наибольшее влияние на УЭП и ОДП и частотную дисперсию, значения которых значительно повышаются при увеличении относительного содержания данных породообразующих компонентов. При этом содержание силикатов, карбонатов и апатитов в породе, наоборот, уменьшается. Наибольший эффект частотной дисперсии электрофизических параметров отмечен в отложениях с распределением проводящего пирита в виде фрамбондов и в микрокристаллическом виде с высоким содержанием ОВ и с примесью глинистых минералов.

Определение относительного содержания породообразующих компонентов баженовской свиты по данным электромагнитных зондирований

Для того чтобы связать дисперсионные свойства пород баженовской свиты с ее литолого-петрофизическими характеристиками, используются модели смешения, устанавливающие связь между породообразующими компонентами и эффективными электрофизическими параметрами пласта в целом. Последние являются макромасштабными величинами. Для определения значения эффективных электрофизических параметров горной породы как сложной смеси могут быть применены различные способы гомогенизации. Распространенные законы смешения учитывают информацию не только об электрофизических параметрах породы и объемной доли ее отдельных компонентов, но и о структуре, включая форму компонентов. Наиболее известны формулы смеси Максвелла-Гарнетта [16], Брюггема [10], когерентного потенциала [13], комплексной рефракционной модели [12], а также Лоенга [15] и Лихтенеккера [14].

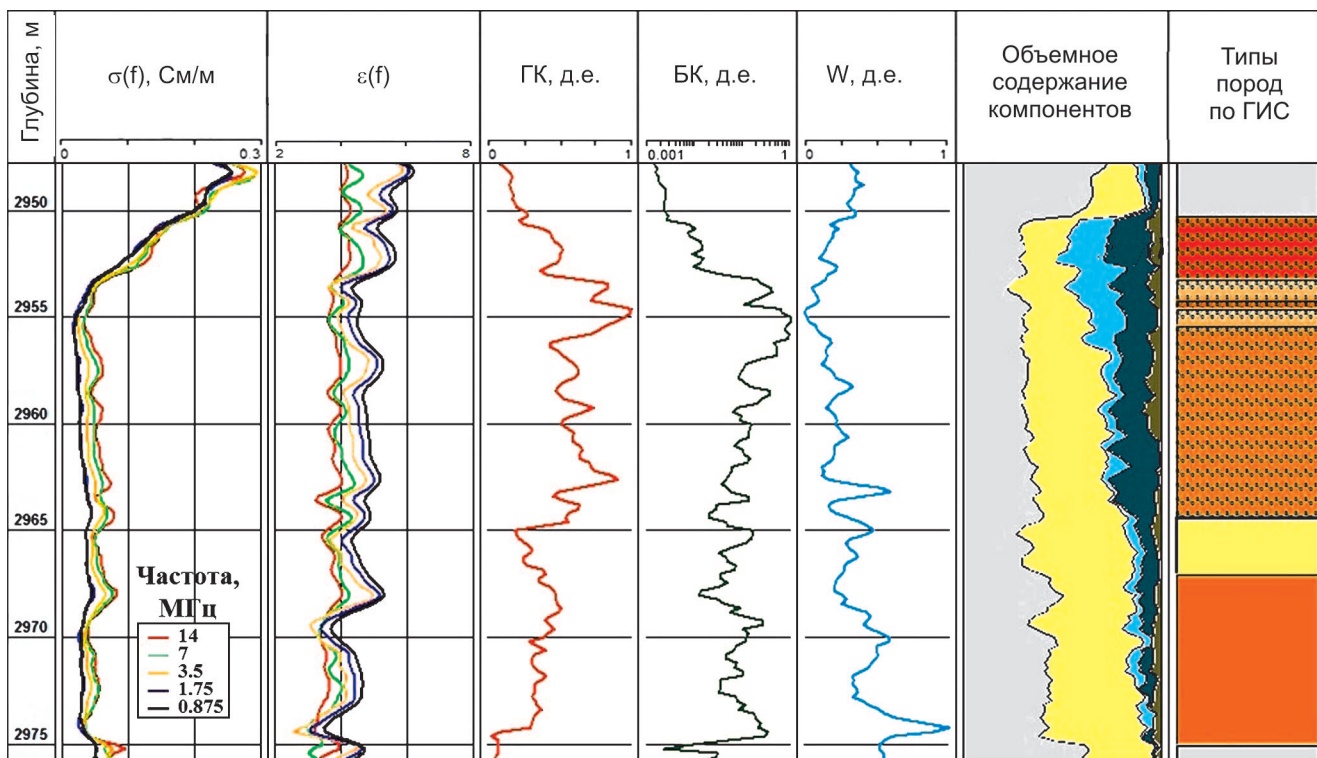


Рис. 4. Литолого-электрофизическая модель баженовской свиты по данным комплекса СКЛ

Усл. обозн. см на рис. 1

Нами рассмотрены три последние, поскольку возможно их широкое применение на практике. Это класс моделей смешения, устанавливающий простое соотношение для получения эффективных параметров смеси на основе средневзвешенных значений ее составляющих. Модели смешения образованы следующими степенными приближениями:

$$\alpha_{eff} = \sum_{i=1}^n f_i \alpha_i^\beta,$$

где f_i – объемная доля фазы; β – степенной параметр; n – число объемных компонентов; α_i – электрофизический параметр каждой фазы (либо диэлектрическая проницаемость, либо удельная электропроводность в зависимости от значения параметра β).

Для описания ОДП используются комплексная рефракционная модель со степенным параметром $\beta = 1/2$, формула Лооенга [15] с $\beta = 1/3$, а также формула линейного закона Зильберштейна [14], где $\beta = 1$. Последняя также применяется для описания УЭП. Формула Лихтенеккера усредняет логарифмы диэлектрических проницаемостей, рассматривается как частный случай степенных смесей.

Создание литолого-электрофизических моделей выполняется на основе данных как стандартных методов ГИС комплекса СКЛ, так и ВЭМКЗ. В последнем случае выполняется численная инверсия электромагнитных сигналов (разностей фаз и относительных амплитуд) с установлением частотно-зависимых УЭП и ОДП и последующим применением формул смеси для определения относительного содержания породообразующих компонентов. На

рис. 4 на первых двух треках отображены частотно-зависимые УЭП и ОДП по данным ВЭМКЗ, на трех следующих – стандартные методы ГИС; на предпоследнем треке показана построенная модель относительного содержания породообразующих компонентов, а на последнем – литологическая колонка с основными типами пород баженовской свиты. Предложенный подход к экспериментальному изучению карбонатно-кремнисто-глинистых высокоуглеродистых отложений по промышленным данным сводится к построению литолого-электрофизических моделей баженовской свиты.

Литолого-электрофизические модели баженовской свиты по данным электромагнитных зондирований

На основе нового подхода к литологической интерпретации данных ГИС построены литолого-электрофизические модели для Русскинской, Федоровской, Восточно-Сургутской и Тайлаковской площадей в Сургутском нефтегазоносном регионе (рис. 5). Модели отражают пространственное распределение породообразующих компонентов по разрезу баженовской свиты, соответствующее сургутскому типу разреза. По представленным моделям баженовская свита перекрывается и подстилается аргиллитами. Высокоуглеродистые породы расположены преимущественно в верхней части разреза. Среди пород свиты преобладают глинисто-кремнистые микститы, пачка силицитов расположена в центральной части разреза. Преобладающее количество карбонатного материала наблюдается преимущественно в верхней части разреза, о чем

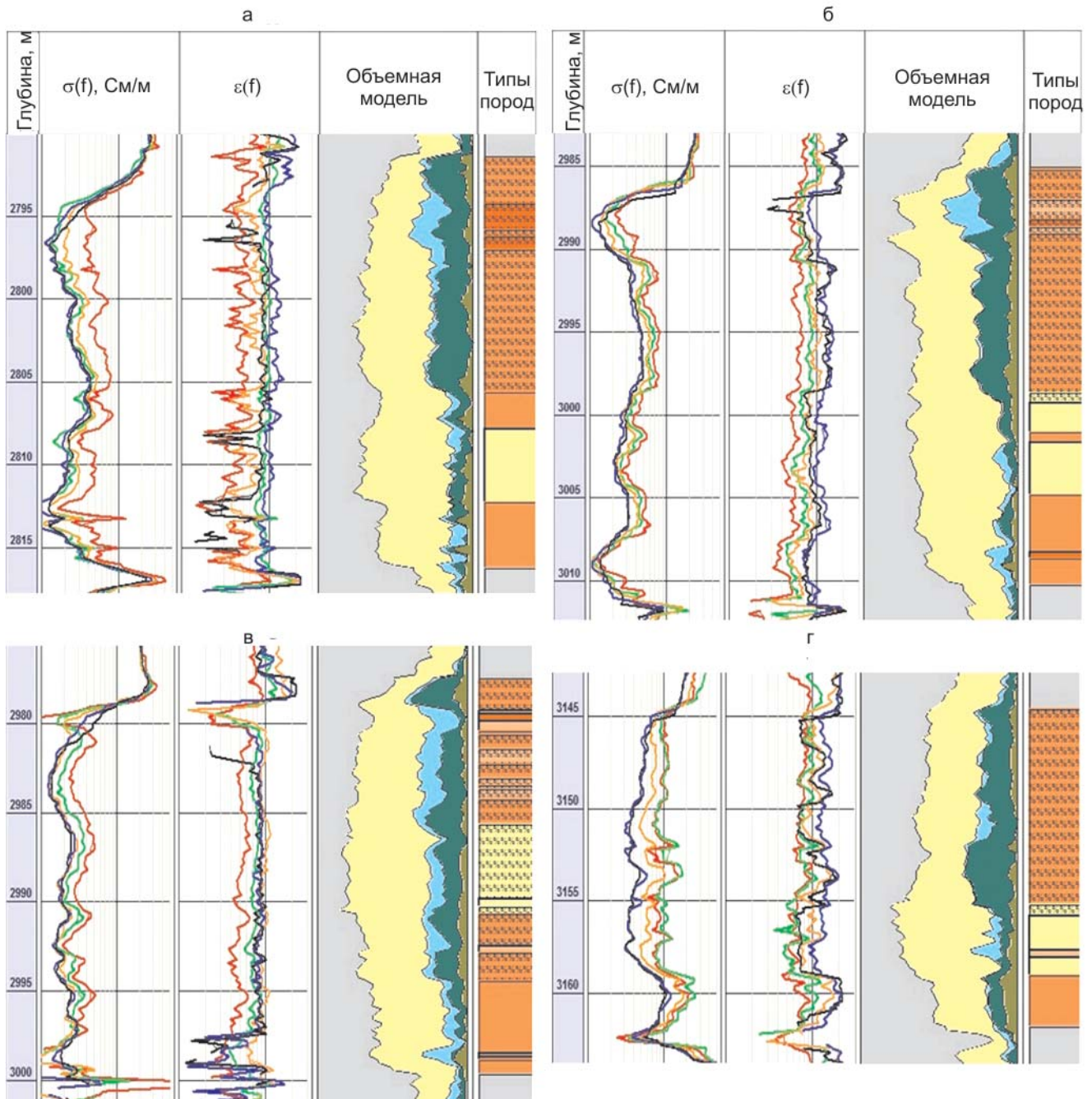


Рис. 5. Литолого-электрофизические модели баженовской свиты для Рускинского (а), Федоровского (б), Восточно-Сургутского (в) и Тайлаковского (г) месторождений Широного Приобья

Усл. обозн. см на рис. 1

свидетельствует наличие карбонатно-кремнистых и карбонатно-глинистых микститов. Отмечается корреляция между относительным содержанием пирита и органического вещества.

В дальнейшем на основе построенных литолого-электрофизических моделей возможно детальное изучение латеральных неоднородностей свиты и выявление закономерностей пространственного распределения основных литологических типов баженитов.

Выводы

Предложен комплексный подход к литолого-электрофизической интерпретации промысловых

данных в интервалах баженовской свиты. Представлены результаты по изучению дисперсионных свойств карбонатно-глинисто-кремнистых битуминозных пород, выявлению частотных зависимостей электрофизических параметров баженитов и установлению их связей с относительным содержанием породообразующих компонентов. На основе численной инверсии практических данных электрометрии из скважин Широного Приобья построены литолого-электрофизические модели баженовской свиты и выполнена классификация основных литологических типов пород. Новый подход широко апробирован при изучении разрезов скважин Среднеазымского, Галяновского, Горшковского, Салым-



ского, Восточно-Правдинского, Малобалыкского, Чупальского, Восточно-Сургутского, Федоровского, Русскинского, Дружного, Горстового, Южно-Ягунского, Межовского, Ракитинского, Повховского и Тайлаковского месторождений.

В заключение отметим, что большие перспективы вовлечения в разработку баженовской свиты обуславливают настоятельную необходимость опережающего развития геофизических технологий для этого до сих пор относительно слабо изученного объекта. Дальнейшие исследования направлены на разработку новых технологий высокоразрешающих геофизических методов для межскважинного просвечивания с возможностью пространственной локализации отложений баженовской свиты с использованием систем наклонно-горизонтальных скважин. Существует возможность детального изучения и картирования латерально неоднородной баженовской свиты из эксплуатационных скважин, бурящихся, например, на целевые верхнеюрские глубокопогруженные объекты.

Научно-исследовательские работы, связанные с изучением дисперсионных свойств баженовской свиты и построением литолого-электрофизических моделей баженовской свиты по промысловым данным, выполнены при финансовой поддержке РНФ (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»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аксельрод С. М.** Влияние частотной дисперсии электрических свойств горных пород на результаты определения удельного сопротивления пластов (по материалам зарубежной литературы) // *Куртажник*. – 2007. – Вып. 10. – С. 103–126.
2. **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.
3. **Глинских В. Н., Никитенко М. Н., Эпов М. И.** Моделирование и инверсия данных электромагнитных зондирований в пластах конечной мощности, вскрытых на биополимерных и нефтяных буровых растворах // *Геология и геофизика*. – 2013. – Т. 54, № 11. – С. 1803–1813.
4. **Классификация** пород баженовской свиты / А. Э. Конторович, П. А. Ян, А. Г. Замирайлова и др. // *Геология и геофизика*. – 2016. – Т. 57, № 11. – С. 2034–2043.
5. **Методические** рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / ред. В. И. Петерсилье, В. И. Пороскун, Г. Г. Яценко. – М.; Тверь: Тверьгеофизика, 2003. – 258 с.
6. **Особенности** формирования баженовской свиты при переходе от юры к мелу в центральной части Западной Сибири / В. Г. Эдер, А. Г. Замирайлова, Ю. Н. Занин и др. // *Литосфера*. – 2015. – № 3. – С. 17–32.
7. **Федосеев А. А., Глинских В. Н., Казаненков В. А.** Относительное содержание порообразующих компонентов и основные литологические типы пород баженовской свиты и ее стратиграфических аналогов по данным геофизических исследований скважин и керн // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2018. – Т. 13, № 2. – 19 с.
8. **Численная** интерпретация данных комплекса методов скважинной электротометрии в высокоомных отложениях баженовской свиты / К. В. Сухорукова, В. Н. Глинских, О. В. Нечаев и др. // *Матер. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. «Тюмень-2015»: Глубокие горизонты науки и недр, Тюмень, 23–27 марта 2015 г.* – 2015, С. UR03, CD-ROM. – [Электронный ресурс].
9. **Эдер В. Г.** Вещественный состав и условия формирования баженовской и георгиевской свит верхней юры – нижнего мела Обь-Иртышского междуречья: автореф. дис. ... к. г.-м. н. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2004. – 17 с.
10. **Bruggeman D. A. G.** Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen, I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen // *Annalen der Physik*. – 1935. – Series 5, vol. 24. – P. 636–679.
11. **Doveton J. H.** Geologic log analysis using computer methods // Chapter 3: Compositional Analysis from Wireline Logs // AAPG. – 1994.
12. **High** dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture / J. R. Birchak, L. G. Gardner, J. W. Hipp, J. M. Victor // *Proceedings of the IEEE*. – 1974. – No. 62 (1). – P. 93–98.
13. **Kohler W. E., Papanicolaou G. C., Chow P. L.** Some applications of the coherent potential approximation // *Multiple scattering and waves*. – New York: North-Holland Publishing Company, 1981. – P. 199–223.
14. **Lichtenecker K., Rother K.** Die Herleitung des logarithmischen Mischungsgesetzes aus allgemeinen Prinzipien der stationären Stromung // *Physik. Zeitschr.* – 1931. – Vol. XXXII. – P. 255–260.
15. **Looyenga H.** Dielectric constants of mixtures // *Physica*. – 1965. – Vol. 31. – P. 401–406.
16. **Maxwell-Garnett J. C.** Colours in metal glasses and metal films // *Trans. of the Royal Society, London*. – 1904. – Vol. CCIII. – P. 385–420.
17. **Mitchell W. K., Nelson R. J.** A practical approach to statistical log analysis // SPWLA 29th Annual Logging Symposium. – 1988. – June 5–8. – Available at: <https://www.spec2000.net/images/STATISTICAL%20LOG%20ANALYSIS.pdf>.
18. **Moss B., Harrison R.** Statistically valid log analysis method improves reservoir description. *Offshore*



Europe conference (Aberdeen, Sept 10–13, 1985) // Paper SPE-13981-MS. – Aberdeen, 1985. – 32 p.

REFERENCES

1. Akselrod S.M. *Vliyanie chastotnoy dispersii elektricheskikh svoystv gornykh porod na rezul'taty opredeleniya udel'nogo soprotivleniya plastov (po materialam zarubezhnoy literatury)* [The influence of the frequency dispersion of the electrical properties of rocks on the results of determining the resistivity of formations (based on foreign literature)]. *Karotazhnik*, 2007, issue 10, pp. 103–126. (In Russ.).

2. Glinskikh V.N., Nesterova G.V., Eпов M.I. Forward modeling and inversion of induction logs from shaly sand reservoirs using petrophysical conductivity models. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, nos. 5–6, pp. 793–799.

3. Glinskikh V. N., Nikitenko M.N., Eпов M.I. Numerical modeling and inversion of electromagnetic logs in the wells drilled with biopolymer and oil-based mud. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 11, pp. 1409–1416.

4. Kontorovich A. E., Yan P.A., Zamiraylova A.G., et al. Classification of rocks of the Bazhenov Formation. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 11, pp. 1606–1612.

5. Peteresilye V.I. *Metodicheskie rekomendatsii po podschetu geologicheskikh zapasov nefti i gaza ob'emnym metodom* [Methodical recommendations for calculating the geological reserves of oil and gas using the volumetric method]. Moscow, Tver, Tvergeofizika Publ., 2003. 258 p. (In Russ.).

6. Eder V.G., Zamiraylova A.G., Zanin Yu.N., et al. [Features of the Bazhenovskaya Formation development during the transition from the Jurassic to the Cretaceous in the central part of West Siberia]. *Litosfera – Lithosphere*, 2015, no. 3, pp. 17–32. (In Russ.).

7. Fedoseev A.A., Glinskikh V.N., Kazanenkov V.A. [Relative content of rock-forming components and main lithological types of the Bazhenovskaya Formation rocks and its stratigraphic analogues according to geophysical studies of wells and core]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2018, vol. 13, no. 2. 19 p. (In Russ.).

8. Sukhorukova K.V., Glinskikh V.N., Nechaev O.V., et al. [Numerical interpretation of data from a complex of methods of borehole electrometry in high-resistance deposits of the Bazhenovskaya Formation]. *Materialy 4-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferen-*

tsii «Tyumen'-2015»: Glubokie gorizonty nauki i nedr, g. Tyumen', 23–27 marta 2015 g. [Materials of the 4th international scientific-practical conference “Tyumen-2015”: Deep horizons of science and mineral resources, Tyumen, March 23–27, 2015]. [Available at CD-ROM], 2015, p. UR03. (In Russ.).

9. Eder V.G. *Veshchestvennyy sostav i usloviya formirovaniya bazhenovskoy i georgievskoy svit verkhney yury – nizhnego mela Ob'-Irtyskogo mezhdurechya (litologiya, 25.00.06): avtoreferat kand. dis.* [Material composition and conditions of the formation of the Bazhenovskaya and Georgievskaya Formations of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous of the Ob – Irtys interfluvium. Author's abstract of the PhD thesis]. Novosibirsk, IPGG SB RAS Publ., 2004. 17 p. (In Russ.).

10. Bruggeman D.A.G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen, I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Annalen der Physik*, 1935, Series 5, vol. 24, pp. 636–679.

11. Doveton J.H. Geologic log analysis using computer methods. Chapter 3: Compositional Analysis from Wireline Logs. *AAPG*, 1994.

12. Birchak J.R., Gardner L.G., Hipp J.W., Victor J.M. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. *Proceedings of the IEEE*, 1974, no. 62 (1), pp. 93–98.

13. Kohler W.E., Papanicolaou G.C., Chow P.L. Some applications of the coherent potential approximation. *Multiple scattering and waves*. New York, North-Holland Publishing Company, 1981, pp. 199–223.

14. Lichteneker K., Rother K. Die Herleitung des logarithmischen Mischungsgesetzes aus allgemeinen Prinzipien der stationären Stromung. *Physik. Zeitschr.*, 1931, vol. XXXII, pp. 255–260.

15. Looyenga H. Dielectric constants of mixtures. *Physica*, 1965, vol. 31, pp. 401–406.

16. Maxwell-Garnett J.C. Colours in metal glasses and metal films. *Trans. of the Royal Society*. London, 1904, vol. CCIII, pp. 385–420.

17. Mitchell W.K., Nelson R.J. A practical approach to statistical log analysis. *SPWLA 29th Annual Logging Symposium*, 1988, June 5–8. Available at: <https://www.spec2000.net/images/STATISTICAL%20LOG%20ANALYSIS.pdf>.

18. Moss B., Harrison R. Statistically valid log analysis method improves reservoir description. Offshore Europe conference (Aberdeen, Sept 10–13, 1985). Paper SPE-13981-MS. Aberdeen, 1985. 32 p.

© В. Н. Глинских, А. А. Федосеев, 2019