



НОВЫЙ МЕТОД ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ: КАРТИРОВАНИЕ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ИЗ ЮРСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ, ВСКРЫТЫХ НАКЛОННО-ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СКВАЖИНАМИ

М. И. Эпов^{1,2}, В. Н. Глинских¹, М. Н. Никитенко¹, К. В. Сухорукова¹,
Д. И. Горносталев¹, И. В. Михайлов¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия; ²Сибирский НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия

Обоснована новая геофизическая технология картирования баженовской свиты на основе импульсных электромагнитных зондирований из скважин. Теоретически показана возможность их применения для изучения свиты из сильнонаклонных и субгоризонтальных скважин, пробуренных в верхне- и среднеюрских пластах. Проведено численное моделирование сигналов в реалистичных геоэлектрических моделях баженовской свиты с реальными траекториями скважин на примере Восточно-Сургутского месторождения. Расчетами установлено, что определение пространственного расположения кровли и подошвы пластов возможно при использовании различной длины зондов. Определены зоны высокой чувствительности полной матрицы магнитного поля к границам при достаточном уровне сигнала на значительном удалении даже при малой длине зонда. Теоретически установлено, что импульсное зондирование баженовской свиты из верхне- и среднеюрских коллекторов реализуемо как для решения задачи картирования границ свиты, так и прослеживания ее латеральной изменчивости.

Ключевые слова: баженовская свита, верхне- и среднеюрские нефтяные коллекторы, импульсное электромагнитное зондирование, геоэлектрическая модель, наклонно-горизонтальная скважина.

NEW METHOD OF PULSED ELECTROMAGNETIC LOGGING SOUNDING: MAPPING THE BAZHENOV FORMATION FROM JURASSIC RESERVOIRS PENETRATED BY INCLINED-HORIZONTAL WELLS

M. I. Epov^{1,2}, V. N. Glinskikh¹, M. N. Nikitenko¹, K. V. Sukhorukova¹, D. I. Gornostalev¹,
I. V. Mikhaylov¹

A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia; Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia

The work is devoted to the substantiation of new geophysical technology for mapping the Bazhenovskaya Formation based on an impulsive electromagnetic sounding from wells. Theoretically shown the possibility of its application to study the formation from highly inclined and subhorizontal wells drilled in the Upper and Middle Jurassic formations. Numerical modeling of the signals in realistic geoelectric models of the Bazhenov Formation with real well trajectories is carried out on the example of the East Surgut field. The calculations have established that the determination of spatial locations of the top and bottom of the beds is possible when using different-length sondes. Zones of high sensitivity of the full magnetic field matrix to the boundaries with a sufficient signal level at considerable distance, even with a small sonde length, are determined. It is theoretically established that pulsed sounding of the Bazhenov Formation from the Upper and Middle Jurassic reservoirs is feasible for both mapping the boundaries of the formation and tracing its lateral variability.

Keywords: Bazhenov Formation, Upper and Middle Jurassic oil reservoirs, pulsed electromagnetic sounding, geoelectric model, inclined and subhorizontal well.

DOI 10.20403/2078-0575-2021-3-31-39

На протяжении последних десятилетий большой интерес вызывает всестороннее изучение черносланцевой толщи в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции – баженовской свиты. Ее уникальность состоит в том, что она является как основным региональным флюидоупором для залежей углеводородов, так и нефтепроизводящей и нефтеносной толщей, высокий потенциал которой доказан многолетней добычей нефти [3, 4, 6, 10, 12]. Применение существующих технологий разведки и освоения запасов нефти баженовской свиты до сих пор остается недостаточно эффективным, поскольку

отсутствуют соответствующие специфике этого сложного геологического объекта методы достоверной идентификации коллекторов нефти и количественной оценки их физических свойств. Значимый этап изучения баженовской свиты – картирование и пространственная локализация нефтеперспективных зон, обеспечивающих снижение неопределенностей при проведении геолого-разведочных работ.

При разработке залежей нефти повсеместно используется наклонно-направленное бурение скважин с горизонтальным завершением, геофизические исследования в которых открывают принципиально



новое направление в геологоразведке баженовской свиты. При использовании наклонно-горизонтальных скважин появляется возможность локализации и детального изучения латеральных неоднородностей нефтесодержащих зон, включая малоамплитудные дизъюнктивные нарушения, с определением их положения и направления в пространстве. Данные измерений в субгоризонтальных скважинах используются для прослеживания латеральных изменений положения кровли и подошвы, а также определения их пространственного положения. Большие перспективы вовлечения в разработку баженовской свиты обуславливают необходимость опережающего развития геофизических технологий применительно к этому относительно слабо изученному объекту.

Наклонно-горизонтального бурения в баженовской свите практически нет, оно выполняется только на ряде месторождений. При этом в Широтном Приобье оно проводится повсеместно, например, при разработке нефтеносных пластов группы ЮС₁₋₂, по глубине расположенных относительно близко к баженовской свите. Применение зондирования из сильнонаклонных и субгоризонтальных скважин, пробуренных в верхне-среднеюрских пластах-коллекторах, открывает новые перспективы изучения баженовской свиты.

Импульсные электромагнитные зондирования могут быть использованы для комплексного решения перечисленных задач. Изучение возможностей метода переходных процессов для задач каротажа началось более полувека назад [9]. В последние два десятилетия выполнен ряд исследований по использованию импульсных электромагнитных каротажных зондирований в наклонно-горизонтальных скважинах.

Возможности использования сверхширокополосных электромагнитных наносекундных импульсов для зондирования нефтегазовых коллекторов изучены в рамках интеграционного проекта СО РАН. Авторами выполнено численное моделирование и проведены физические эксперименты по изучению распространения таких импульсов во флюидонасыщенном коллекторе [7, 14, 15, 17, 24]. Все результаты позднее были опубликованы в монографии [25].

Известны и другие результаты изучения возможности метода переходных процессов для решения задач каротажа в процессе бурения и геонавигации траекторий наклонно-горизонтальных скважин [11, 16, 21]. Этот метод с трехкомпонентными измерениями применяется для определения кажущихся электропроводности, угла наклона пласта и азимутального угла [26], а также коэффициента электрической макроанизотропии [29]. Известны работы, посвященные мониторингу электрофизических параметров коллектора [28, 30] и обнаружению границы коллектора на значительном удалении от скважин [27].

Результаты представленных исследований направлены на научное обоснование новой технологии картирования и пространственной локализации латеральных неоднородностей и нефтеперспектив-

ных зон с использованием пространственно-распределенной системы наклонно-горизонтальных скважин на основе электромагнитных зондирования методом переходных процессов. Зондирующая установка состоит из генераторной катушки, в которой реализуется импульс в виде выключения тока, и приемной, где измеряется ЭДС в зависимости от времени. С использованием созданных вычислительных алгоритмов и разработанного программного обеспечения проведено математическое моделирование сигналов импульсных электромагнитных зондирований в реалистичных геоэлектрических моделях баженовской свиты [23] с реальными траекториями скважин. В связи с высокой ресурсоемкостью алгоритмов и программ масштабные расчеты выполняются с использованием вычислительных ресурсов Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН. Геоэлектрические модели построены по результатам обработки и интерпретации практических данных электрокаротажа современного скважинного комплекса «Луч» (СКЛ) [1]. Литологическая интерпретация моделей баженовской свиты по промысловым данным приведена в [5, 22, 23].

В настоящей статье определяются возможности импульсного электромагнитного каротажного зондирования баженовской свиты из наклонно-горизонтальной скважины, пробуренной в нефтеносном пласте-коллекторе ЮС₁ или ЮС₂ верхне- и среднеюрского нефтегазоносных комплексов Восточно-Сургутского месторождения.

Отметим, что продолжение этой работы будет посвящено численному анализу возможности межскважинного импульсного электромагнитного зондирования баженовской свиты с использованием системы наклонно-горизонтальных скважин, пробуренных в нефтеносных пластах-коллекторах БС₂₂ ачимовской части осложненного неокомского комплекса и указанного пласта-коллектора ЮС₁.

Геоэлектрическая модель нижнемеловых – среднеюрских отложений Восточно-Сургутского месторождения по промысловым данным

Промышленной нефтеносностью в среднеюрских отложениях тюменской свиты обладает пласт ЮС₂, в верхнеюрских отложениях васюганской – ЮС₁, а в нижнемеловых отложениях ачимовской пачки сортынской свиты – БС₂₂. Этот разрез представлен типичными терригенными песчано-глинистыми отложениями, их продуктивная часть – неравномерно переслаивающимися песчаниками, алевролитами и аргиллитами с тонкими прослоями карбонатов и углей [2].

Для построения реалистичной геоэлектрической модели проанализированы диаграммы ГИС в близко расположенных вертикальных скважинах и проинтерпретированы данные электрокаротажа. На этом месторождении над и под баженовской свитой находятся нефтесодержащие коллекторы БС₂₂, ЮС₁, ЮС₂.

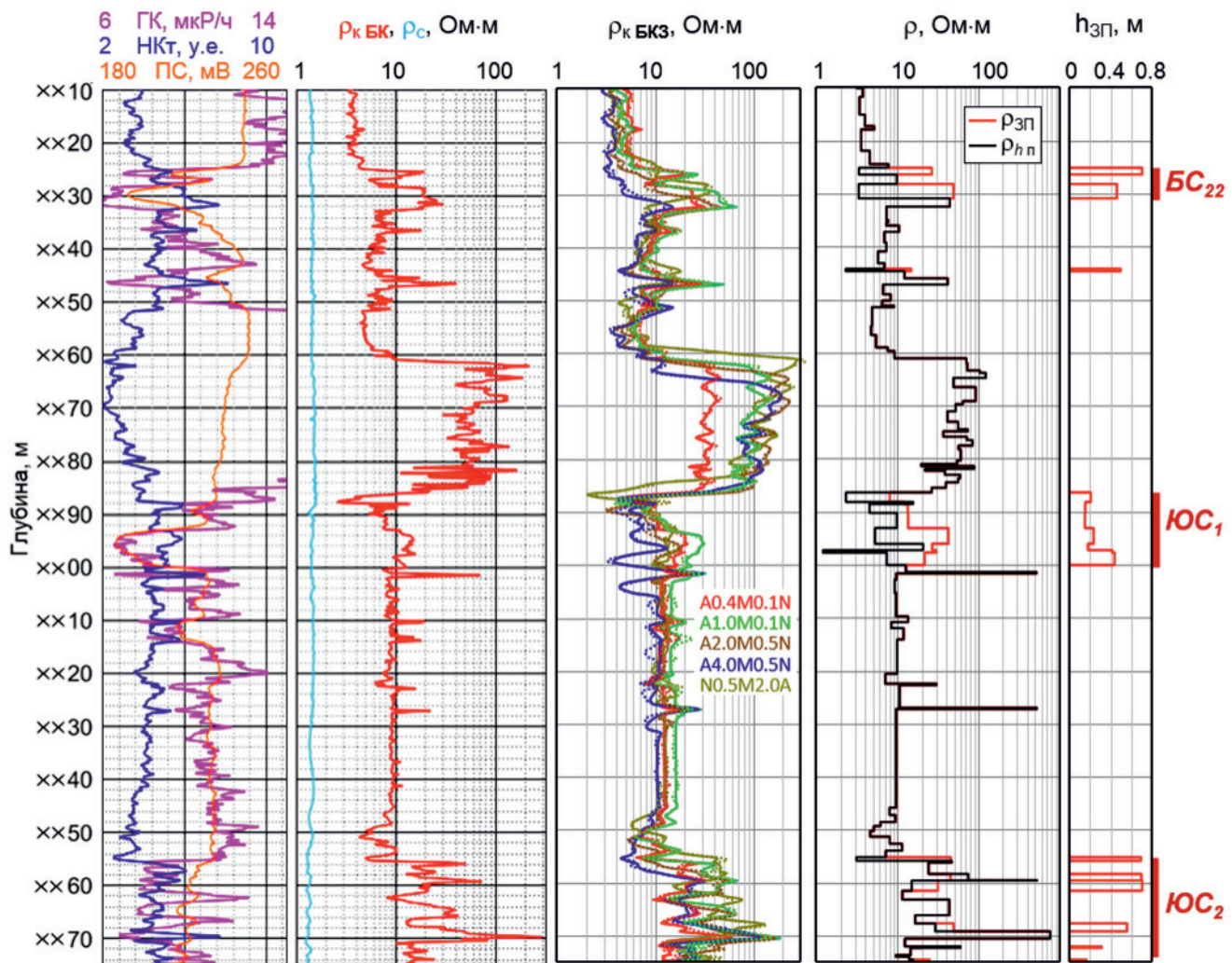


Рис. 1. Практические диаграммы каротажа и параметры резистивной модели отложений. Слева направо: ГК, НКт, ПС; БК (кажущееся УЭС $\rho_{к\text{БК}}$), УЭС бурового раствора (ρ_c); БКЗ (кажущееся УЭС $\rho_{к\text{БКЗ}}$); УЭС пластов модели (неизменной проникновением части – $\rho_{нп}$); зоны проникновения – $\rho_{зп}$; толщина зоны проникновения ($h_{зп}$)

Во всех вертикальных скважинах комплекс ГИС включает боковое каротажное зондирование (БКЗ), позволяющее детально изучить удельное электрическое сопротивление отложений. Выявление коллекторов основывается на комплексном анализе данных всего комплекса: гамма-каротажа (ГК), нейтронного каротажа (НКт), потенциала самополяризации (ПС); бокового каротажа (БК) и БКЗ. После попластовой разбивки проводится численная инверсия этих данных в рамках осесимметрической резистивной модели [13, 18, 19, 23]. При этом определяются значения удельного электрического сопротивления (УЭС) пластов, уточняется положение кровли и подошвы, а также устанавливаются параметры зоны проникновения. В результате инверсии получается детализированная геоэлектрическая модель: для анизотропных непроницаемых пластов – значения УЭС в горизонтальной плоскости и в вертикальном направлении; для проницаемых отложений – УЭС пласта, а также УЭС и толщина зоны проникновения.

Пример практических диаграмм и резистивной модели приведен на рис. 1. Качество решения обратной задачи подтверждается совпадением син-

тетических и измеренных (сплошные и пунктирные линии соответственно) сигналов в пределах точности измерений. Кроме этого, аналогичное сравнение выполняется для сигналов БК, которые не участвовали в инверсии. Проницаемые пласты выделяются по наличию зоны проникновения. Ее УЭС показано красным цветом; толщина приведена на крайнем правом графике. В непроницаемых глинистых пластах и баженовской свите УЭС может быть анизотропным.

Для моделирования сигналов импульсного электромагнитного зондирования значения УЭС пластов детальной модели осредняются (по продольной электропроводности пластов). Полученная геоэлектрическая модель отложений, обобщенная по данным из нескольких скважин, приведена на рис. 2. На текущем этапе исследований вычисления выполнены для изотропной модели, построенной по значениям горизонтального УЭС.

Численное моделирование и анализ результатов

Базовой моделью для анализа электромагнитных сигналов и их чувствительности к геоэлек-

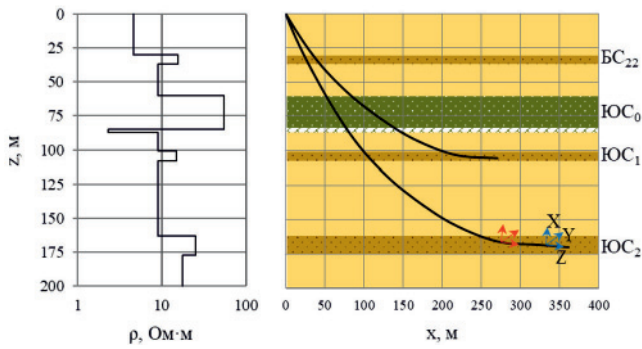


Рис. 2. Обобщенная изотропная резистивная модель пластов: УЭС (ρ) и положение границ (z); траектории скважин с горизонтальным завершением; положение источника и приемника. Цветовые обозначения: желтый – глинистые породы и аргиллиты, зеленый – баженинты, коричневый – коллекторы BC_{22} , $ЮС_1$ и $ЮС_2$, серый – глины георгиевской свиты. Глубина отсчитывается от условной точки

трическим параметрам среды является горизонтально-слоистая изотропная модель (см. рис. 2). Каждый слой характеризуется своими значениями УЭС и мощностью. Верхний и нижний слои – полупространства. Источник поля – произвольно ориентированная катушка, в которой реализуется выключение тока. В приемных катушках измеряется наведенная ЭДС в зависимости от времени. При решении прямой задачи предполагается, что размеры катушек бесконечно малы. Введем декартову систему координат так, что ось z направлена вниз, а источник и приемник лежат в плоскости Oxz . В этой ситуации ненулевыми являются xx -, yy -, zz -, xz - и zx -компоненты магнитного поля, где первый символ означает направление магнитного диполя, а второй – измеряемую компоненту магнитного поля. При измерениях в наклонно-горизонтальных скважинах используется система координат прибора, где ось Z направлена вдоль скважины. Эта система координат образована поворотом исходной системы координат на зенитный угол наклона скважины. В ней также ненулевыми являются компоненты магнитного поля XX , YY , ZZ , XZ и ZX .

Во временной области решение получено путем обратного преобразования Фурье гармонического электромагнитного поля, умноженного на спектр импульса тока в генераторной катушке. В решении задачи об определении гармонического электромагнитного поля использован метод, основанный на его представлении в виде суммы нормального и аномального полей, а также преобразованиях Фурье и Фурье–Бесселя по радиальным переменным. Уравнения Максвелла, которым подчиняется аномальное электромагнитное поле, приведены к дифференциальным уравнениям с известным фундаментальным решением. Известные коэффициенты определяются из граничных условий. Нормальное поле вычислено в явном виде. Окончательно решение во временной области представлено в виде двойного интеграла (преобразования Фурье и Фурье–Бесселя). Быстрое затуха-

ние осциллирующих подынтегральных выражений обеспечено переводом интегрирования в комплексные плоскости пространственной переменной и частоты, являясь основой эффективных вычислений. С использованием полученного решения созданы алгоритм и компьютерная программа моделирования сигналов импульсных зондирований, которые допускают распараллеливание по частотным и пространственным гармоникам, поскольку численное интегрирование осуществляется с помощью специальных квадратурных формул и реализовано в виде суммирования [8, 20].

Для анализа чувствительности сигналов к геоэлектрическим параметрам среды используются логарифмические производные сигналов по параметрам, показывающие относительную скорость изменения сигнала при изменении параметра. Кроме того, в линейном приближении оценивается относительная погрешность определения параметра при заданной погрешности измерения:

$$\delta = \frac{\Delta_f}{\left| \frac{\partial f}{\partial p}(p_0) p_0 \right|} 100\%.$$

Здесь $\Delta_f = |f| f^0 + f^a$ – суммарная абсолютная ошибка измерения; f – сигнал; f^0 и f^a – его относительная и абсолютная погрешности; p_0 – значение оцениваемого параметра.

Чтобы установить возможности импульсных зондирований при картировании кровли и подошвы баженовской свиты, проведена серия численных экспериментов в описанной реалистичной модели. Для расчета чувствительностей сигналов к границам свиты выбраны следующие значения погрешностей измерения: $f^0 = 0,02$, $f^a = 10$ нВ. Для демонстрации результатов моделирования показаны ЭДС для компонент поля XX , ZZ и ZX . Результаты для YY -компоненты схожи с результатами для компоненты XX . Компоненты XZ и ZX также характеризуются поведением ЭДС и ее чувствительности. Рассмотрим две характерные ситуации импульсного зондирования из наклонно-горизонтальной скважины с горизонтальным завершением, лежащей в нефтеносном коллекторе (в первом случае в $ЮС_1$, во втором – в $ЮС_2$).

1. Зондирование из скважины в пласте $ЮС_1$

На рис. 3 приведены уровни ЭДС для XX -, ZZ - и ZX -компонент в зависимости от времени и от положения зонда вдоль скважины (координатой зонда является его центр). Для удобства горизонтальными цветными линиями отмечены положения границ пластов BC_{22} , $ЮС_0$, и кровли пласта $ЮС_1$. Рассматривается компактная зондирующая установка с длиной зонда (расстояние между источником и приемником) 1 м, дипольный магнитный момент зонда – $100 \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

Уровни измеряемых сигналов показаны разными цветами: темно-красному соответствуют высокие значения, синему – низкие. Как видно из рис. 3, наблюдается изменение характера пове-

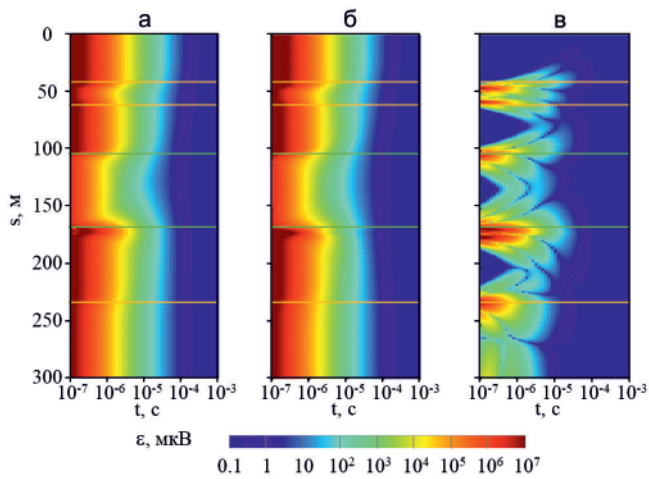


Рис. 3. ЭДС (мкВ) для компонент XX (а), ZZ (б) и ZX (в) в зависимости от времени и положения зонда вдоль траектории при импульсном электромагнитном зондировании баженовской свиты из скважины с горизонтальным завершением в пласте ЮС₁

дения временных зависимостей при пересечении неоднородной по вертикали пачки пластов, причем для диагональных компонент XX и ZZ границы между более контрастными пластами выражены более отчетливо. Тонкий пласт низкоомных глин георгиевской свиты проявляется как увеличение уровня сигнала на ранних временах для диагональных компонент. Перекрестная компонента ZX показывает положение границы максимумом сигнала. С использованием зонда малой длины и полного набора компонент в интервале нижнемеловых отложений ачимовской свиты и верхнеюрских отложений васюганской свиты разрез уверенно расчленяется, включая выделение маломощных пропластков.

На рис. 4 слева приведены относительные погрешности определения положения кровли баженовской свиты при движении зонда вдоль скважины. Синему цвету соответствуют малые ошибки, красному – большие. Для диагональной компоненты XX хорошая чувствительность (ошибка <10 %) появляется при приближении к кровле сверху, когда

расстояние до нее по вертикали становится меньше 30 м. Сначала чувствительность появляется на поздних временах, потом и на ранних. При удалении от кровли свиты на 25 м снизу чувствительность постепенно теряется. Для диагональной компоненты ZZ хорошая чувствительность появляется, когда положение зонда находится в пределах от 40 м сверху от кровли до 35 м снизу. Слабая чувствительность (ошибка около 30 %) сохраняется и при положении зонда в коллекторе ЮС₁, т. е. при расстоянии до кровли около 45 м. Для перекрестной компоненты ZX чувствительность к кровле пропадает при входе в коллектор. Результаты указывают на то, что даже с помощью измерений коротким зондом определение положения кровли свиты из горизонтального участка скважины в коллекторе ЮС₁ возможно в относительно узком диапазоне времен (около 10^{-4} с).

На рис. 4 справа приведены относительные ошибки определения положения подошвы баженовской свиты. В среднем зонды для разных компонент начинают чувствовать нижнюю границу свиты за 55 м при движении сверху вниз. Хорошая чувствительность к подошве сохраняется и на всем нижележащем интервале скважины, в том числе в коллекторе ЮС₁ на расстоянии 20 м от подошвы. Уверенное картирование подошвы свиты наблюдается в широком диапазоне времен (10^{-5} – 10^{-3} с).

Таким образом, на Восточно-Сургутском месторождении импульсное зондирование баженовской свиты из скважины с субгоризонтальным завершением в нефтеносном пласте-коллекторе ЮС₁ верхнеюрского нефтегазоносного комплекса реализуемо для решения задачи как картирования границ свиты, так и прослеживания ее латеральных неоднородностей.

2. Зондирование из скважины в пласте ЮС₂

Рассмотрим ситуацию с глубоко залегающим относительно баженовской свиты коллектором ЮС₂. Его верхняя граница удалена от подошвы свиты на расстояние около 80 м. Необходимо выяснить, возможно ли картирование границы свиты из удален-

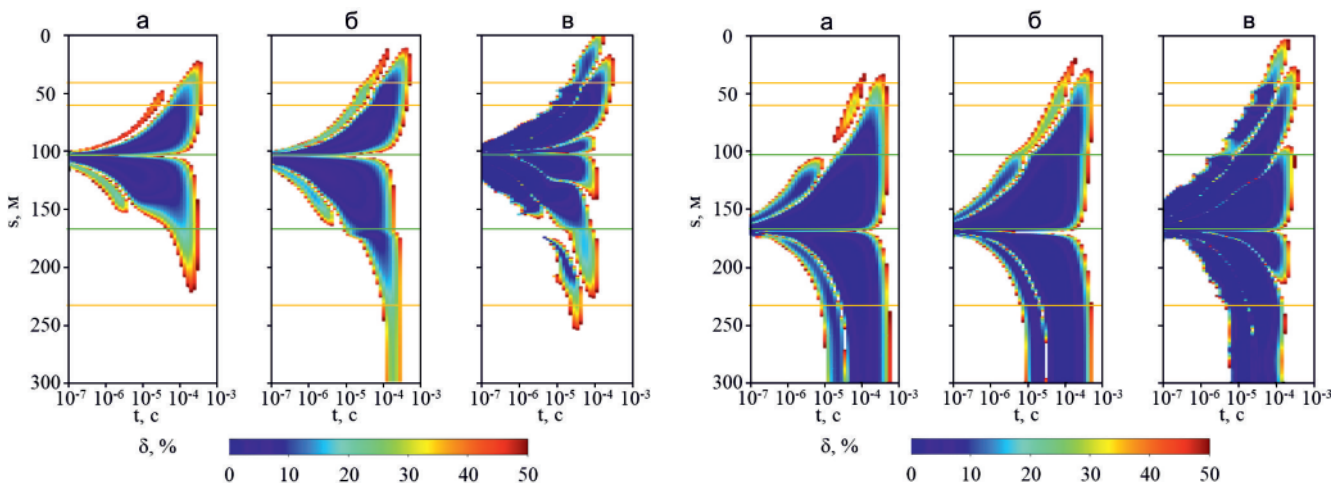


Рис. 4. Относительная ошибка определения положения кровли (слева) и подошвы (справа) баженовской свиты для компонент поля XX (а), ZZ (б) и ZX (в) в зависимости от времени и положения зонда вдоль траектории при импульсном электромагнитном зондировании свиты из скважины с горизонтальным завершением в пласте ЮС₁

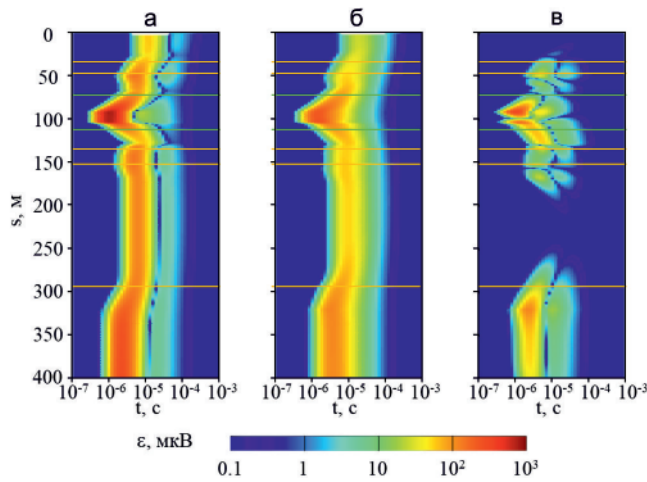


Рис. 5. ЭДС для компонент XX (а), ZZ (б) и ZX (в) в зависимости от времени и от положения зонда вдоль траектории при импульсном электромагнитном зондировании баженовской свиты из скважины с горизонтальным завершением в пласте ЮС₂

На рис. 6 справа приведены относительные ошибки определения положения подошвы баженовской свиты, которое может быть оценено в интервале скважины до ее входа в коллектор. В самом коллекторе ЮС₂ только компонента ZZ имеет слабую чувствительность к положению подошвы: ошибка при определении соответствующей границы составляет около 30 % в узком диапазоне времен – $5 \cdot 10^{-4}$ с. Приведенные результаты моделирования показывают

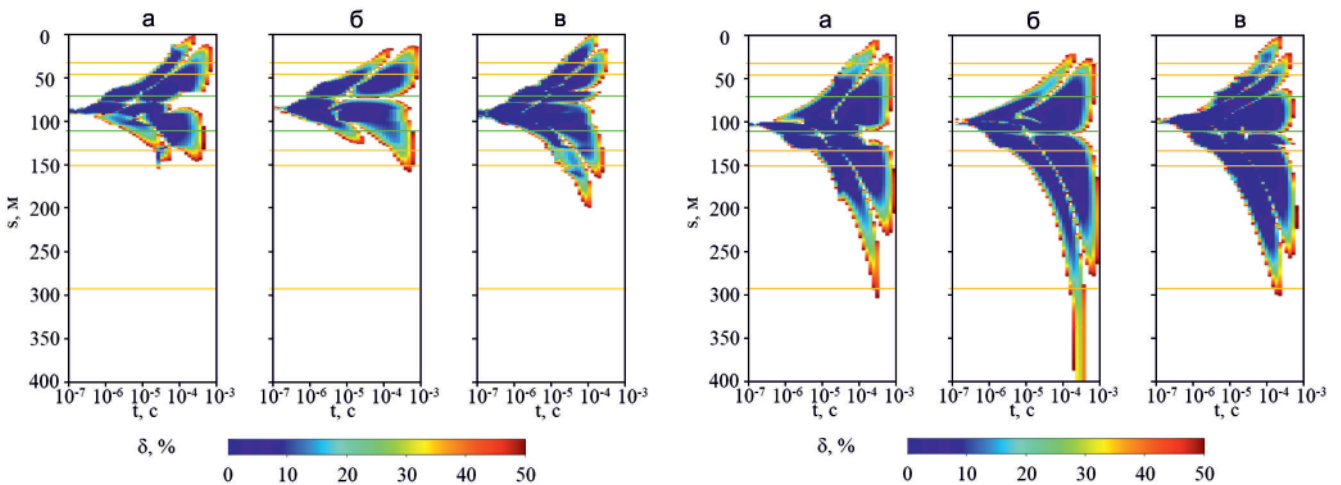


Рис. 6. Относительная ошибка определения положения кровли (слева) и подошвы (справа) баженовской свиты для компонент XX (а), ZZ (б) и ZX (в) в зависимости от времени и от положения зонда вдоль траектории при импульсном электромагнитном зондировании свиты из скважины с горизонтальным завершением в пласте ЮС₂

ного пласта. Чтобы повысить глубинность измерений, увеличим длину зонда до 25 м.

На рис. 5 приведены уровни ЭДС для XX -, ZZ - и ZX -компонент в зависимости от времени и от положения зонда. В интервале скважины до ее пересечения с подошвой баженовской свиты пласты уверенно различаются на диагональных компонентах, а ниже лежащая толща с УЭС около 9, 15 и 9 Ом·м соответственно ввиду низкого контраста воспринимается как однородная. При входе в коллектор ЮС₂ с УЭС около 25 Ом·м сигналы вновь демонстрируют значительное изменение. Картина с перекрестной компонентой ZX несколько размыта по сравнению с сигналами зонда длиной 1 м, максимумы сигналов сдвинуты относительно границ. В сравнительно однородной толще, расположенной ниже свиты, сигналы сильно уменьшаются и начинают возрастать только при приближении к пласту ЮС₂ на 7 м. В целом разрез как нижне-меловых, так и верхне- и среднеюрских отложений дифференцируется по сигналам.

Чувствительность к кровле больше у перекрестной компоненты ZX (рис. 6, слева). Она сохраняется при удалении от кровли на 50 м. Однако при нахождении зонда в пласте ЮС₂ картировать кровлю по его сигналу трудно, определение ее положения выполняется с большой относительной погрешностью.

ют, что импульсное зондирование баженовской свиты при картировании ее границ также возможно и из горизонтальной скважины, пробуренной в глубоко погруженном нефтеносном пласте-коллекторе ЮС₂ среднеюрского нефтегазоносного комплекса, если он залегает менее чем в 80 м от подошвы свиты.

Таким образом, импульсное электромагнитное каротажное зондирование баженовской свиты из наклонно-горизонтальных скважин, проходящих в целевых объектах верхне- и среднеюрских отложений, в целом может быть реализовано. Сигналы диагональных компонент показывают значительную дифференциацию при переходе из одного пласта в другой при наличии контраста УЭС больше 2. Сигналы перекрестных компонент для коротких зондов (около 1 м) показывают положение геоэлектрической границы максимумом сигнала. Положение кровли и подошвы свиты можно прослеживать из коллектора ЮС₁ по данным измерений даже короткими зондами. Из коллектора ЮС₂ возможно картирование только подошвы свиты на расстоянии до 80 м по данным измерений длинными зондами (около 20 м).

Выводы

Результаты представленных исследований направлены на обоснование технологии картирова-



ния 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. С использованием созданных вычислительных алгоритмов проведено численное моделирование сигналов в реалистичных геоэлектрических моделях баженовской свиты с реальными траекториями скважин на примере Восточно-Сургутского месторождения. Расчетами показано, что определение положения границ свиты возможно при каротаже скважин с длинами зондов от первых единиц до первых десятков метров. Необходимо применять как диагональные, так и перекрестные компоненты поля, которые характеризуются высокой чувствительностью к геоэлектрическим границам баженовской свиты при достаточном уровне сигнала на расстоянии до 30 м даже при малой длине зонда (1–2 м).

Полученные результаты составляют основу для изучения возможности межскважинного импульсного электромагнитного зондирования баженовской свиты с использованием системы наклонно-горизонтальных скважин, пробуренных в нефтеносных пластах нижнемеловых и верхнеюрских отложений.

Научно-исследовательские работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ (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. Аппаратурный** комплекс СКЛ для каротажа в нефтегазовых скважинах и его интерпретационная база / К. Н. Каюров, В. Н. Еремин, А. Н. Петров и др. // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 38–43.
- 2. Атлас** месторождений нефти и газа Ханты-Мансийского автономного округа. Т. 2. / ред. В. А. Волков, А. И. Шпильман. – Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2013. – 308 с.
- 3. Баженовский** горизонт Западной Сибири. Стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность / Ю. В. Брадучан, А. В. Гольберт, Ф. Г. Гурари и др. // Тр. ИГиГ СО АН СССР. – 1986. – № 649. – 217 с.
- 4. Геохимия** юрских и нижнемеловых отложений Западно-Сибирской низменности / А. Э. Конторович, Е. Л. Берман, Л. И. Богородская и др. // Тр. СНИИГГиМС, Сер. Нефтяная геология. Вып. 36. – М.: Недра, 1971. – 251 с.
- 5. Глинских В. Н., Федосеев А. А.** Новый подход к литолого-электрофизической интерпретации данных электромагнитных зондирований в интервалах баженовской свиты // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2019. – № 4 (40). – С. 80–88.
- 6. Гурари Ф. Г.** О поисках нефти и газа в мезозое Западно-Сибирской низменности // Тр. СНИИГГиМС. Вып. 17. – Л.: Гостоптехиздат, 1961. – С. 81–92.
- 7. Дальность** обнаружения идеально проводящей плоскости, расположенной в водонасыщенной среде нефтегазового коллектора, при зондировании 0,5 нс импульсом георадара «ОКО-2» / М. И. Эпов, В. Л. Миронов, К. В. Музалевский и др. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9–3. – С. 263–265.
- 8. Кауфман А. А., Морозова Г. М.** Теоретические основы метода зондирований становлением поля в ближней зоне. – Новосибирск: Наука, 1970. – 123 с.
- 9. Кауфман А. А., Соколов В. П.** Теория индукционного каротажа методом переходных процессов. – Новосибирск: Наука, 1972. – 128 с.
- 10. 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.
- 11. Онегова Е. В., Эпов М. И.** Трехмерное моделирование нестационарного электромагнитного поля для задач геонавигации горизонтальных скважин // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 7. – С. 925–930.
- 12. 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.
- 13. Петров А. М., Нечаев О. В., Сухорукова К. В.** Двумерная инверсия сигналов российского электрокаротажа, измеренных на интервалах сложностроенных отложений [Электронный ресурс] // Геомодель-2019: 21-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (Геленджик, 9–13 сентября 2019 г.): тез. докл. – 2019. – С. 1–4.
- 14. Применение** метода дискретных источников для расчета полей СШП импульсного электромагнитного дипольного зонда в средах нефтегазового коллектора / М. И. Эпов, В. Л. Миронов, К. В. Музалевский и др. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9–3. – С. 257–262.
- 15. Распространение** сверхширокополосного электромагнитного импульса в нефтенасыщенной среде коллектора в присутствии водонефтяного контакта / М. И. Эпов, В. Л. Миронов, С. А. Комаров и др. // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 1. – С. 58–66.
- 16. Ратушняк А. Н., Теплухин В. К.** Теоретические и экспериментальные основы индукционных методов исследований скважин. – Екатеринбург: УРО РАН, 2017. – 127 с.
- 17. Сравнительный** анализ двух методов расчета электромагнитных полей в прискважинном пространстве нефтегазовых коллекторов / М. И. Эпов, С. И. Кабанихин, В. Л. Миронов и др. // Сибирский



журнал индустриальной математики. – 2011. – № 2. – С. 132–138.

18. **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.

19. **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 (43). – С. 77–86.

20. **Табаровский Л. А.** Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики. – Новосибирск: Наука, 1975. – 144 с.

21. **Технология** геонавигации бурового инструмента в слоистой среде нефтегазового коллектора / М. И. Эпов, В. Л. Миронов, К. В. Музалевский и др. // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 9. – С. 1404–1410.

22. **Федосеев А. А., Глинских В. Н., Казаненков В. А.** Относительное содержание породообразующих компонентов и основные литологические типы пород баженовской свиты и ее стратиграфических аналогов по данным геофизических исследований скважин и керна // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2018. – Т. 13, № 2. – 19 с. – Точка доступа: http://www.ngtp.ru/rub/2/15_2018.pdf.

23. **Частотная** дисперсия электрофизических характеристик и электрическая анизотропия пород баженовской свиты по данным электрокаротажа / М. И. Эпов, В. Н. Глинских, А. М. Петров и др. // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 9. – С. 62–64.

24. **Электромагнитное** зондирование флюидонасыщенного слоистого коллектора наносекундными импульсами / М. И. Эпов, В. Л. Миронов, С. А. Комаров и др. // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 12. – С. 1357–1365.

25. **Эпов М. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В.** Сверхширокополосное электромагнитное зондирование нефтегазового коллектора. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 114 с.

26. **Banning E. J., Hagiwara T., Ostermeier R. M.** Imaging of a Subsurface Conductivity Distribution Using a Time-domain Electromagnetic Borehole Conveyed Logging Tool // 2007 SEG Annual Meeting (San Antonio, Texas, USA, September 23–28, 2007). – 2007. – Document ID: SEG-2007-0648.

27. **Deep** Detection of Formation Boundary Using Transient Electromagnetic Logging Method / X. Yuan, S. Deng, X. Hu, et al. // 2019 SEG International Exposition and Annual Meeting (San Antonio, Texas, USA, September 15–20, 2019). – 2019. – Document ID: SEG-2019-3215911.

28. **Felix Servin J. M., Ellis E. S., Schmidt H. K.** Proximity Sensing: A Novel Approach to Reservoir Saturation Monitoring Using High Frequency Electromagnetic Pulses // SPE Annual Technical Conference

and Exhibition (San Antonio, Texas, USA, October 9–11, 2017). – 2017. – Document ID: SPE-187282-MS.

29. **Hagiwara T.** Transient Tri-axial Induction Measurements: Apparent Dip and Apparent Anisotropy // 2011 SEG Annual Meeting (San Antonio, Texas, USA, September 18–23, 2011). – 2011. – Document ID: SEG-2011-0417.

30 **New** Borehole Transient Electromagnetic System for Reservoir Monitoring / S. M. Dutta, A. Reiderman, L. G. Schoonover, et al. // Petrophysics. – 2012. – Vol. 53, no. 3. – P. 222–232.

REFERENCES

1. Kayurov K.N., Eremin V.N., Petrov A.N., et al. [SKL hardware systems for logging in oil-gas wells and its interpretation base]. *Neftyanoye khozyaystvo – Oil Industry*, 2015, no. 9, pp. 38–43. (In Russ.).

2. Volkov V.A., Shpilman A.I., eds. *Atlas mestorozhdeniy nefi i gaza Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga. T. 1* [Atlas of oil and gas fields of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. Vol. 2]. Khanty-Mansiisk, IzdatNaukaServis Publ., 2013. 308 p. (In Russ.).

3. Braduchan Yu.V., Golbert A.V., Gurari F.G., et al. [The Bazhenovskiy horizon of West Siberia. Stratigraphy, paleogeography, ecosystem, oil content]. *Trudy IGIG SO AN SSSR. Vyp. 649* [Proceedings of IGIG. No. 649]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 217 p. (In Russ.).

4. Kontorovich A.E., Berman E.L., Bogorodskaya L.I., et al. [Geochemistry of Jurassic and Lower Cretaceous deposits of West-Siberian Lowland]. *Tr. SNIIGGiMS. Seriya Neftyanaya geologiya. Vyp. 36* [SNIIGGiMS proceedings. Petroleum Geology Series. No. 36]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 251 p. (In Russ.).

5. Glinskikh V.N., Fedoseev A.A. [A new approach to litho-electrophysical interpretation of electromagnetic sounding data in the Bazhenovskaya Formation intervals]. *Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Sibiri – Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2019, no. 4(40), pp. 80–88. (In Russ.).

6. Gurari F.G. [About petroleum exploration in the Mesozoic of West-Siberian Lowland]. *Trudy SNIIGGiMS [SNIIGGiMS Proceedings]*. Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1961, no. 17, pp. 81–92. (In Russ.).

7. Eпов M.I., Mironov V.L., Muzalevskiy, et al. [The detection range of an ideally conducting plane located in the water-saturated environment of the petroleum reservoir, when probing 0.5 ns with OKO-2 georadar pulse]. *Izvestiya vuzov. Fizika – Russian Physics Journal*, 2010, vol. 53, no. 9–3, pp. 263–265. (In Russ.).

8. Kaufman A.A., Morozova G.M. *Teoreticheskiye osnovy metoda zondirovaniy stanovleniem polya v blizhney zone* [Theoretical foundations of the method of sounding by the formation of the field in the near zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 123 p. (In Russ.).

9. Kaufman A.A., Sokolov V.P. *Teoriya induktsionnogo karotazha metodom perekhodnykh processov* [Theory of induction logging by the method of transients]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1972. 128 p. (In Russ.).



10. Kontorovich A.E., Yan P.A., Zamirailova A.G., et al. Classification of rocks of the Bazhenov Formation. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 11, pp. 1606–1612.
11. Onegova E.V., Eпов M.I. 3D simulation of transient electromagnetic field for geosteering horizontal wells. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 7, pp. 725–729.
12. Eder V.G., Zamirailova A.G., Zanin Yu.N., et al. [Features of the black shale Bazhenovo Formation on the transition from Jurassic to Cretaceous in the central part of the Western Siberia]. *Litosfera – Lithosphere*, 2015, no. 3, pp. 17–32. (In Russ.).
13. Petrov A.M., Nechaev O.V., Sukhorukova K.V. [Two-dimensional inversion of Russian electric logging signals measured at intervals of complex sediments]. *Geomodel-2019: 21-ya konferentsiya po voprosam geologorazvedki i razrabotki mestorozhdeniy nefti i gaza (Gelendzhik, 9–13 sentyabrya 2019)* [Geomodel-2019: 21st Conference on geological exploration and development of oil and gas fields (Gelendzhik, September 9–13, 2019)]. 2019, pp. 1–4. (In Russ.).
14. Eпов M.I., Mironov V.L., Muzalevskiy, et al. [Application of the discrete source method for calculating the fields of the UWB pulsed electromagnetic dipole sonde in oil and gas reservoir media]. *Izvestiya vuzov.Fizika – Russian Physics Journal*, 2010, vol. 53, no. 9–3, pp. 257–262. (In Russ.).
15. Eпов M.I., Mironov V.L., Komarov S.A., et al. Ultrabroadband electromagnetic wave propagation in hydrocarbon reservoirs in the presence of an oil-water interface]. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 1, pp. 16–20.
16. Ratushnyak A.N., Teplukhin V.K. *Teoreticheskiye i eksperimentalnyye osnovy induktsionnykh metodov issledovaniy skvazhin* [Theoretical and experimental principles of induction methods of well research]. Yekaterinburg, UrB RAS Publ., 2017. 127 p. (In Russ.).
17. Eпов M.I., Kabanikhin S.I., Mironov V.L., et al. [A comparative analysis of two methods for calculating electromagnetic fields in the near-well space of oil and gas reservoirs]. *Sibirskiy zhurnal industrialnoy matematiki*, 2011, no. 2, pp. 132–138. (In Russ.).
18. Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Nechaev O.V. [Numerical inversion of electric logs in anisotropic sediment intervals]. *Karotazhnik*, 2017, no. 4(274), pp. 34–48. (In Russ.).
19. Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Nechaev O.V. [Geoelectric models of Cretaceous reservoirs of West Siberia by the results of integrated interpretation of electric log data]. *Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Sibiri – Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2020, no. 3(43), pp. 77–86. (In Russ.).
20. Tabarovskiy L.A. *Primeneniye metoda integralnykh uravneniy v zadachakh geolektriki* [Application of the integral equation method in geoelectrics problems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1975. 144 p. (In Russ.).
21. Eпов M.I., Mironov V.L., Muzalevskiy K.V., et al. A geosteering tool for horizontal well logging. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 9, pp. 1103–1107.
22. Fedoseev A.A., Glinskikh V.N., Kazanenkov V.A. [Relative content of rock-building components and basic lithological types of rocks of the Bazhenov Formation and its stratigraphic analogues according to log and core data]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika – Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*, 2018, vol. 13, no. 2, 19 p. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/2/15_2018.pdf. (In Russ.).
23. Eпов M.I., Glinskikh V.N., Petrov A.M., et al. [Frequency dispersion of electrophysical characteristics and resistivity anisotropy of the Bazhenov Formation deposits according to resistivity logging data]. *Neftyanoye khozyaistvo – Oil industry*, 2019, no. 9, pp. 62–64. (In Russ.).
24. Eпов M.I., Mironov V.L., Komarov S.A., et al. Nanosecond electromagnetic sounding of a fluid-saturated layered formation. *Russian Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 12, pp. 1054–1060.
25. Eпов M.I., Mironov V.L., Muzalevskiy K.V. *Sverhshirokopolosnoe elektromagnitnoe zondirovanie neftegazovogo kollektora* [Ultra-wideband electromagnetic sounding of oil and gas reservoir]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2011. 114 p. (In Russ.).
26. Banning E.J., Hagiwara T., Ostermeier R.M. Imaging of a Subsurface Conductivity Distribution Using a Time-domain Electromagnetic Borehole Conveyed Logging Tool. *2007 SEG Annual Meeting (San Antonio, Texas, USA, September 23–28, 2007)*, 2007. Document ID: SEG-2007-0648.
27. Yuan X., Deng S., Hu X., et al. Deep Detection of Formation Boundary Using Transient Electromagnetic Logging Method. *2019 SEG International Exposition and Annual Meeting (San Antonio, Texas, USA, September 15–20, 2019)*, 2019. Document ID: SEG-2019-3215911.
28. Felix Servin J.M., Ellis E.S., Schmidt H.K. Proximity Sensing: A Novel Approach to Reservoir Saturation Monitoring Using High Frequency Electromagnetic Pulses. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (San Antonio, Texas, USA, October 9–11, 2017)*, 2017. Document ID: SPE-187282-MS.
29. Hagiwara T. Transient Tri-axial Induction Measurements: Apparent Dip and Apparent Anisotropy. *2011 SEG Annual Meeting (San Antonio, Texas, USA, September 18–23, 2011)*, 2011. Document ID: SEG-2011-0417.
30. Dutta S.M., Reiderman A., Schoonover L.G., et al. New Borehole Transient Electromagnetic System for Reservoir Monitoring. *Petrophysics*, 2012. vol. 53, no. 3, pp. 222–232.

© М. И. Эпов, В. Н. Глинских, М. Н. Никитенко,
К. В. Сухорукова, Д. И. Горностаев,
И. В. Михайлов, 2021