



МЕЖСКВАЖИННОЕ ИМПУЛЬСНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПРОСВЕЧИВАНИЕ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ИЗ НИЖНЕМЕЛОВЫХ И ВЕРХНЕЮРСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ

М. И. Эпов^{1,2}, В. Н. Глинских², М. Н. Никитенко², К. В. Сухорукова²,
А. М. Петров², Д. И. Горносталев², И. В. Михайлов²

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

Приведено теоретическое обоснование нового направления в геологоразведке баженовской свиты – технологии межскважинного импульсного электромагнитного просвечивания, в основе которой лежит идея вовлечения системы вертикальных и горизонтальных скважин, пробуренных в целевых объектах нижнемеловых и верхнеюрских отложений. Высокий потенциал и новые возможности предложенной технологии продемонстрированы на реалистичных моделях разрезов скважин Восточно-Сургутского месторождения (Широтное Приобье). По результатам численного моделирования установлено, что электромагнитные сигналы имеют высокий уровень и чувствительность к геоэлектрическим параметрам баженовской свиты, что обеспечивает ее межскважинное просвечивание на значительном расстоянии между скважинами с источниками и приемниками. Выполненное исследование значительно расширяет возможности электромагнитного зондирования методом переходных процессов применительно к задачам нефтепромысловой геофизики в новых постановках.

Ключевые слова: баженовская свита, нижнемеловые и верхнеюрские нефтяные коллекторы, импульсное электромагнитное зондирование, межскважинное просвечивание, вертикальная и горизонтальная скважины.

CROSS-WELL PULSED ELECTROMAGNETIC EXPLORATION OF THE BAZHENOV FORMATION FROM LOWER CRETACEOUS AND UPPER JURASSIC RESERVOIRS

M. I. Epov^{1,2}, V. N. Glinskikh², M. N. Nikitenko², K. V. Sukhorukova², A. M. Petrov², D. I. Gornostalev², I. V. Mikhaylov²

¹Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia; ²A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The article is devoted to the theoretical substantiation of new direction in geological exploration of the Bazhenov Formation – the technology of pulsed electromagnetic cross-well exploration, which is based on the idea of involving a system of vertical and horizontal wells drilled in target objects of Lower Cretaceous and Upper Jurassic deposits. The high potential and new capabilities of the proposed technology are demonstrated on realistic models of well sections of the East-Surgut field (Latitudinal Ob Region). Based on the results of numerical simulation, it was found that electromagnetic signals have a high level and sensitivity to the geoelectric parameters of the Bazhenov Formation, which ensures its cross-well exploration at a considerable distance between wells with sources and receivers. The performed research significantly expands opportunities of electromagnetic sounding by the method of transient processes as applied to the tasks of oilfield geophysics in new formulations.

Keywords: Bazhenov Formation, Lower Cretaceous and Upper Jurassic oil reservoirs, pulsed electromagnetic sounding, cross-well exploration, vertical and horizontal wells.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-1-73-79

Представленные в статье результаты являются логическим продолжением научного исследования, связанного с созданием новой технологии импульсного электромагнитного зондирования для пространственной локализации отложений баженовской свиты [3]. Этот уникальный нефтеперспективный объект слабо изучен; отложения свиты вскрыты, как правило, вертикальными скважинами, лишь на некоторых месторождениях – горизонтальными. Идея настоящей работы заключается в том, что изучение баженовской свиты становится возможным из субгоризонтальных скважин, пробуренных для исследования ниже- и вышележащих целевых объектов, находящихся на расстоянии

первых десятков метров от интервала свиты. Повсеместное наклонно-направленное бурение скважин, ориентированное на другие объекты, позволит также проследить положение баженовской свиты в разрезе, изменение свойств и параметров ее толщи и латеральных неоднородностей. Основные задачи состоят в теоретическом обосновании новой технологии каротажа на основе электромагнитного зондирования методом переходных процессов с произвольным токовым импульсом с помощью компьютерного моделирования.

Ранее была опубликована статья [3], посвященная установлению возможности импульсного электромагнитного каротажного зондирования

баженовской свиты из наклонно-горизонтальной скважины в нефтеносном пласте-коллекторе под свитой [4, 11]. Опираясь на результаты численного моделирования в реалистичных постановках, мы сделали вывод о том, что импульсное зондирование баженовской свиты из верхне- и среднеюрских нефтеносных коллекторов реализуемо как для картирования границ свиты, так и для прослеживания ее латеральной изменчивости.

В предлагаемой статье обосновывается технология межскважинного просвечивания с использованием систем эксплуатационных скважин, бурящихся на верхнеюрские и нижнемеловые целевые объекты. В частности, рассматривается система одного из кустов Восточно-Сургутского месторождения, пробуренного в нефтеносных пластах-коллекторах БС₂₂ ачимовской части неокомского комплекса и ЮС₁ верхнеюрского комплекса [1].

Прежде чем перейти непосредственно к изложению полученных результатов, необходимо рассмотреть опыт межскважинного просвечивания геофизическими методами. Традиционно для межскважинного просвечивания используются системы вертикальных скважин с размещенными в них источником и приемником или их наборами. На основе зарубежных публикаций можно выделить самые разнообразные области его применения между как необсаженными, так и обсаженными скважинами. Межскважинное просвечивание применяется для решения задач литологического расчленения разреза, определения пространственного распределения флюидонасыщения, изучения структуры залежи, картирования границ коллектора по латерали, оценки петрофизических свойств, включая пористость и проницаемость, мониторинга коллекторов при обводнении и интенсификации нефтедобычи [6, 10].

Отметим, что на сегодняшний день мало публикаций (они есть только за рубежом), посвященных межскважинному просвечиванию с использованием наклонно-горизонтальных скважин, имеющих не только теоретический характер, но и практическое опробование. Так, в [9] на основе двух- и трехмерного численного моделирования изучается возможность межскважинного просвечивания между двумя необсаженными горизонтальными скважинами на расстоянии нескольких десятков метров для решения задач мониторинга. В [12] выполнено моделирование электромагнитных сигналов для задачи межскважинной томографии с использованием двух горизонтальных, а также вертикальной и горизонтальной скважин для выделения обводненных зон в межскважинном пространстве до 1,2 км. В [13] представлена система межскважинной электромагнитной телеметрии для кустового бурения при разработке нетрадиционных ресурсов нефти и газа на месторождениях США. Статья [8] посвящена оценке объема трещины гидроразрыва пласта с привлечением данных индукционного

и электрического методов. В [7] для разделения нефте- и водонасыщенных интервалов применяется низкочастотное индукционное просвечивание карбонатного трещиноватого коллектора в Саудовской Аравии между двумя субпараллельными горизонтальными нагнетательной и добывающей скважинами длиной около 1,0 км, расположенными на расстоянии 1,3 км. Авторы подчеркивают, что проведенное ими межскважинное просвечивание из далеко расположенных горизонтальных скважин с целью усовершенствованной добычи нефти и повышения нефтеизвлечения – первый опыт в нефтегазовой индустрии.

Таким образом, научное обоснование новой технологии импульсного электромагнитного зондирования для картирования и пространственной локализации латеральных неоднородностей и нефтеперспективных зон баженовской свиты в межскважинном пространстве наклонно-горизонтальных скважин представляется актуальным направлением исследования.

Система межскважинного просвечивания нижнемеловых и верхнеюрских отложений Восточно-Сургутского месторождения

Баженовская свита является не только основным региональным флюидоупором для залежей углеводородов, но и нефтепроизводящей и нефтеносной толщей, высокий потенциал которой доказан многолетней добычей нефти. Она характеризуется значительной пространственной неоднородностью отложений, существенно отличается от вмещающих ее пород по физическим свойствам и минеральному составу. Применительно к изучению свиты выполняется литологическая интерпретация по промысловым данным, в том числе с использованием современных комплексов каротажа.

Типичная современная система разработки нефтяного месторождения представляет собой набор скважин с различными траекториями. Для оптимизации расходов на разработку применяют кустовое бурение, когда скважины забуриваются с одной площадки, но их эксплуатационные секции располагаются в различных местах целевого нефтеносного пласта. В зависимости от геолого-технологических условий траектории наклонно-направленных скважин в пространстве могут быть вертикальными, S-образными, J-образными и горизонтальными.

В настоящем исследовании целесообразно рассматривать ситуации, где две скважины с разными траекториями проходят близко друг к другу. В таком случае можно выделить следующие типичные ситуации.

Первая включает два горизонтальных ствола, пробуренных на один целевой объект параллельно друг другу, при этом характерное расстояние между ними составляет от 250–300 до 500–700 м (рис. 1). В случае, когда два горизонтальных ствола бурятся

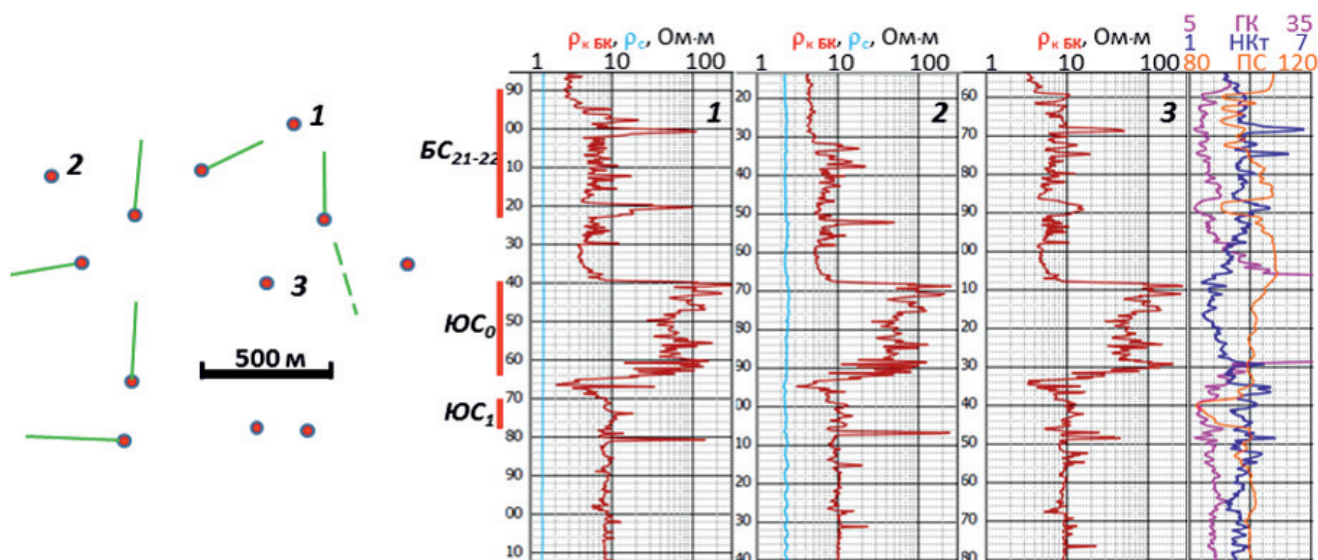


Рис. 1. Пример расположения вертикальных и наклонно-горизонтальных стволов на Восточно-Сургутском месторождении (слева), вскрывающих коллектор ЮС₂ (красными точками показано положение входа в коллектор, зелеными линиями – горизонтальные стволы в коллекторе). Справа – диаграммы кажущегося сопротивления по данным БК в скв. 1–3 и данные ГК, НКт, ПС в скв. 3

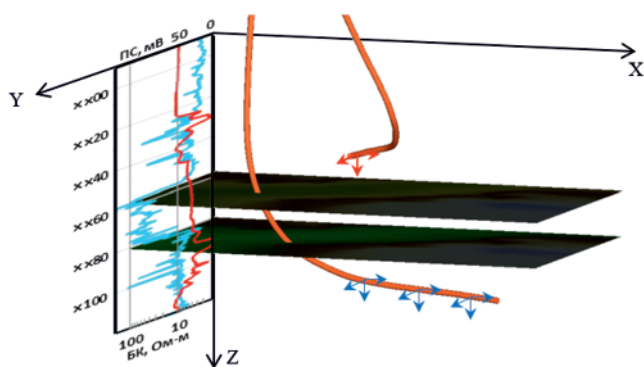


Рис. 2. Модель горизонтальных скважин, проходящих в коллекторах БС_{21–22} и ЮС₁. Плоскостями показаны кровля и подошва баженовской свиты, слева приведены данные ПС (красная линия) и БК (голубая линия), красными стрелками обозначены магнитные моменты источников, синими – приемников

из одной скважины, расстояние между ними или их интервалами может быть меньше 200 м. Вторая ситуация: два горизонтальных ствола пробурены на один целевой объект под углом или ортогонально друг другу, причем вертикальный или наклонный участок одной из скважин расположен над горизонтальным участком другой. В этом случае в системе межскважинного просвечивания могут быть задействованы как вертикальные (наклонные), так и горизонтальные участки скважин. Расстояние между горизонтальным участком одной скважины и вертикальным (наклонным) участком другой варьируется от 100 до 300 м, а расстояние между ортогональными горизонтальными стволами не меньше 200 м, при этом их протяженность может достигать 1,0 км и более. Третья ситуация, рассмотренная ниже, включает две горизонтальные скважины, пробуренные на два целевых объекта и направленные по разным азимутам, минимальное расстояние между

которыми может быть меньше 100 м. Необходимо отметить, что, используя вертикальную скважину, можно существенно расширить возможности системы межскважинного просвечивания.

Повторяемость и вариативность электрических свойств разреза нижнемеловых и верхнеюрских отложений наглядно иллюстрируется практическими данными бокового каротажа в трех близких вертикальных скважинах 1–3 ($\rho_{\text{БК}}$, выстроены по кровле баженовской свиты; см. рис. 1). Между ними положение и толщина пласта ЮС₁ меняются незначительно, а мощность нижнемеловых коллекторов увеличивается от скв. 1 к скв. 3. Изменения при больших удалениях более значительные и для относительного положения коллекторов и баженовской свиты, и для их сопротивления.

Расстояние от скв. 2 до скв. 1 и 3 около 900 м, между скв. 1 и 3 – около 600 м, между вертикальными и близкими горизонтальными стволами может составлять около 100 м. Аналогичным образом вскрываются горизонтальными скважинами и другие меловые и юрские коллекторы. Применительно к изучению баженовской свиты практический интерес представляет модель, в которой горизонтальные стволы проходят в коллекторах БС_{21–22} и ЮС₁ (рис. 2). Так как скважины проходят в коллекторах по разным азимутам, то в некоторой области могут сближаться между собой (их траектории в плане пересекаются). В этом случае в одной из скважин можно расположить источники электромагнитного поля (на рис. 2 – в верхней), а в другой – приемники.

УЭС пластов и их толщины определяются двумерной численной инверсией данных БКЗ [3, 5]. Осредненные параметры базовой геоэлектрической модели пластов приведены в таблице, при этом УЭС коллекторов БС_{21–22} и ЮС₁ (с горизонтальными сква-

Параметры базовой геоэлектрической модели пластов разреза

Пласт	Кровля, м	Подошва, м	Толщина, м	УЭС, Ом·м
Аргиллит	0	30	30	4,6
Коллектор БС ₂₁₋₂₂	30	37	7	15,5
Аргиллит	37	60	23	9,1
Баженовская свита	60	85	25	55
Георгиевская свита	85	87	2	2,3
Аргиллит	87	101	14	9
Коллектор ЮС ₁	101	108	7	15
Аргиллит	108	140	32	9

жинами) соответствует нефтенасыщенным песчаникам.

Численное моделирование и обсуждение результатов

Для анализа электромагнитных сигналов и их чувствительности к геоэлектрическим параметрам среды используется горизонтально-слоистая модель. Источником электромагнитного поля является произвольно ориентированная катушка, в которой реализуется выключение тока. В приемных катушках измеряется ЭДС в зависимости от времени. Декартова система координат определена таким образом, чтобы ось z была направлена вниз, а источник и приемник лежали в плоскости Oxz (см. рис. 2). В этой ситуации ненулевыми являются XX -, YY -, ZZ -, XZ - и ZX -компоненты поля, где первый символ означает направление магнитного диполя, а второй – измеряемую компоненту поля в системе координат модели.

Получено решение прямой задачи для импульса тока произвольной формы. На его основе созданы алгоритм и компьютерная программа моделирования сигналов импульсных зондирований, которые допускают распараллеливание по частотным и пространственным гармоникам [2].

С помощью логарифмических производных сигналов по параметрам оценивается ошибка 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 межскважинных импульсных зондирований при картировании кровли и подошвы баженовской свиты, проведены

численные эксперименты в реалистичной модели разреза (см. таблицу). Для расчета чувствительностей сигналов к границам баженовской свиты взяты следующие значения моментов зондов и погрешностей измерения: $M = 100 \text{ А} \cdot \text{м}^4$; $f^0 = 0,02$, $f^a = 10 \text{ нВ}$.

Рассмотрим две горизонтальные скважины, находящиеся в пластах БС₂₂ и ЮС₁ сверху и снизу баженовской свиты (см. рис. 2). Расстояние между ними – 70 м по вертикали, причем пространственное расположение скважин относительно друг друга произвольно. Источник электромагнитного поля находится в верхнем коллекторе, приемник – в нижнем. Будем оценивать горизонтальное (азимутальное) расстояние x между ними, при котором возможно определение положения кровли и подошвы свиты. Иными словами, для реализации межскважинного просвечивания определяем, насколько могут быть разнесены источник и приемник по горизонтали.

На рис. 3 приведены уровни ЭДС для YY -, ZZ - и XZ -компонент поля в зависимости от времени и от горизонтального расстояния между источником и приемником. Уровни измеряемых сигналов показаны изолиниями. Расстояние между источником и приемником очень значительно и изменяется от 70 до 212 м, поэтому уровни сигналов невелики. Самый большой уровень наблюдается для диагональной YY -компоненты и достигает нескольких десятых долей мкВ на средних временах регистрации и расстояниях $x = 0$ –90 м. На расстояниях около 180 м сигналы становятся сравнимыми с ошибкой измерения и практически не измеряемыми для рассматриваемых моментов источника и приемника. Расстояния могут быть увеличены при больших моментах источника и приемника. Тем не менее и для используемого момента при расстояниях по горизонтали до 180 м межскважинное просвечивание возможно в разрезе от нижнемеловых отложений ачимовской толщи и до верхнеюрских отложений васюганской свиты.

На рис. 4 также с помощью изолиний приведены относительные ошибки определения положения кровли и подошвы баженовской свиты для компоненты YY . Хорошая чувствительность к кровле ($\delta < 10\%$) сохраняется на расстояниях $x < 90$ м. Ее картирование возможно в диапазоне времен 10^{-5} – 10^{-4} с. Ошибки определения положения подошвы баженовской свиты намного ниже, т. е. чувствительность выше к подошве. Это связано с тем, что нижний коллектор ближе к подошве свиты по сравнению с верхним. Для компоненты YY хорошая чувствительность наблюдается на расстояниях $x < 150$ м. Даже при $x = 200$ м для YY -компоненты присутствует чувствительность к подошве (ошибка до 40 %). Таким образом, при значительных удалениях (до 200 м) положение подошвы свиты надежно определяется в широком диапазоне времен – около 10^{-5} – 10^{-4} с.

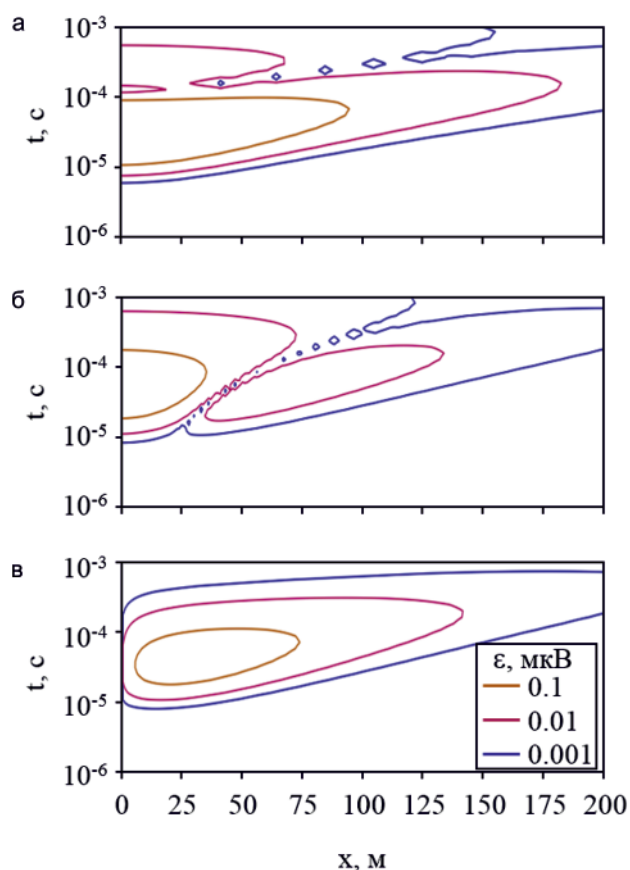


Рис. 3. ЭДС для YY- (а), ZZ- (б), и XZ-компонент (в) поля в зависимости от времени и от горизонтального расстояния между источником и приемником, расположенными в скважинах с горизонтальным завершением в пластах-коллекторах БС₂₂ и ЮС₁, при импульсном электромагнитном межскважинном просвечивании ЮС₀

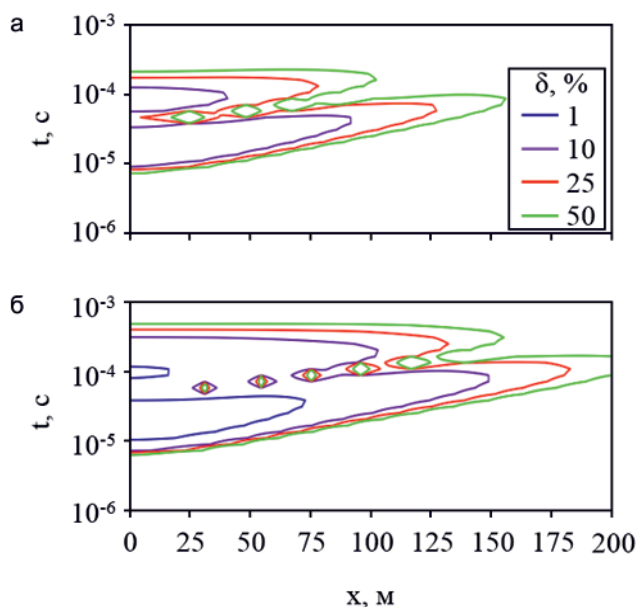


Рис. 4. Относительная ошибка определения положения кровли (а) и подошвы (б) баженовской свиты для YY-компоненты поля в зависимости от времени и от горизонтального расстояния между источником и приемником, расположенными в скважинах с горизонтальным завершением в пластах-коллекторах БС₂₂ и ЮС₁, при импульсном электромагнитном межскважинном просвечивании ЮС₀

Наряду с этим рассмотрен случай межскважинного просвечивания системой вертикальной и горизонтальной скважин. В вертикальной скважине, пересекающей баженовскую свиту, располагается источник электромагнитного поля, а приемник, как и в предыдущем случае, находится в скважине с горизонтальным завершением в коллекторе ЮС₁. Расчеты показывают, что хорошая чувствительность к границам сохраняется при значительных горизонтальных расстояниях между источником и приемником (до 150 м) и возрастает или убывает при приближении или удалении источника от границы.

Выводы

На примере Восточно-Сургутского месторождения показаны возможности межскважинного электромагнитного просвечивания баженовской свиты с использованием системы вертикальных и горизонтальных скважин, пробуренных в нижнемеловых и верхнеюрских коллекторах. Представленные результаты численного моделирования демонстрируют высокий потенциал предложенного метода для решения задачи картирования границ баженовской свиты и исследования ее латеральной изменчивости. Расчетами установлено, что электромагнитные сигналы характеризуются высоким уровнем и чувствительностью к изучаемым объектам, если вертикальное расстояние между горизонтальными скважинами не превышает 70 м, а азимутальное расстояние между источниками и приемниками не более 200 м. Значительное расширение возможности предлагаемого метода может быть выполнено за счет использования зондирующих импульсов разного спектрального состава, что представляет интерес для дальнейшего исследования.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Атлас** месторождений нефти и газа Ханты-Мансийского автономного округа. Т. 2 / под ред. В. А. Волкова, В. А. Шпильмана. – Тюмень; Ханты-Мансийск, 2013. – 308 с.
2. **Никитенко М. Н., Глинских В. Н., Горностаев Д. И.** Математическое обоснование импульсных электромагнитных зондирований для новых задач нефтепромысловой геофизики // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2021. – № 2. – С. 179–192.
3. **Новый** метод импульсного электромагнитного зондирования: картирование баженовской свиты из юрских коллекторов, вскрытых наклонно-горизон-

тальными скважинами / М. И. Эпов, В. Н. Глинских, М. Н. Никитенко и др. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – № 3 (47). – С. 31–39.

4. **Разработка** метода импульсных электромагнитных зондирований для изучения баженовской свиты / М. Н. Никитенко, В. Н. Глинских, М. И. Эпов и др. // Saint Petersburg 2020. Geosciences: Converting Knowledge into Resources (Saint Petersburg, Russia, 6–9 April 2020). – СПб., 2020. – С. 1–5. – URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202053067>.

5. **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.

6. **Advanced** Progress of TFEM Method for Hydrocarbon Mapping / Z. He, G. Yu, Z. Wang, et al. // 2017 SEG International Exposition and Annual Meeting (Houston, Texas, USA, September 24–29, 2017). – 2017. – Document ID: SEG-2017-16928506.

7. **Crosswell** Electromagnetic Induction Between Two Widely Spaced Horizontal Wells: Coiled-tubing Conveyed Data Collection and 3D Inversion from a Carbonate Reservoir in Saudi Arabia / A. F. Marsala, S. Lyngra, M. Safdar, et al. // 2015 SEG Annual Meeting (New Orleans, Louisiana, USA, October 18–23, 2015). – 2015. – Document ID: SEG-2015-5891203.

8. **Hoversten G. M., Schwarzbach C.** Monitoring Hydraulic Fracture Volume using Surface to Borehole EM and Conductive Proppant // 2018 SEG International Exposition and Annual Meeting (Anaheim, California, USA, October 14–19, 2018). – 2018. – Document ID: SEG-2018-2984673.

9. **Kaputerko A., Alumbaugh D., Levesque C.** A Modeling Comparison of Two Crosswell EM Systems for Water Flood Monitoring in Horizontal Wells // 2009 SEG Annual Meeting (Houston, Texas, USA, October 25–30, 2009). – 2009. – Document ID: SEG-20090888.

10. **Three-dimensional** Multiplicative-regularized Non-linear Inversion Algorithm for Cross-well Electromagnetic and Controlled-source Electromagnetic Applications / A. Abubakar, J. Liu, T. Habashy, et al. // 2008 SEG Annual Meeting (Las Vegas, Nevada, USA, November 9–14, 2008). – 2008. – Document ID: SEG-2008-0584.

11. **Transient** Electromagnetic Soundings for Mapping the Spatially Heterogeneous Bazhenov Formation [Электронный ресурс] / V. Glinskikh, D. Gornostalev, I. Mikhaylov, et al. // 82nd EAGE Conference and Exhibition 2020 (Amsterdam, The Netherlands, December 8–11, 2020). – Amsterdam, 2020. – URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202011531>

12. **Wilt M., Zhang P., Safdar M.** Crosswell Electromagnetic Tomography in Unconventional Well Geometries // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (Denver, Colorado, USA, October 30 – November 2, 2011). – 2011. – Document ID: SPE147152-MS.

13. **Zeng S., Dong Q., Chen J.** A Novel Casing Antenna System for Crosswell Electromagnetic Telemetry in Pad Drilling // SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference (Austin, Texas, USA, July 24–26, 2017). – 2017. – Document ID: URTEC-2668280-MS.

REFERENCES

1. Volkov V.A., Szpilman V.A., eds. *Atlas mestorozhdeniy nefi i gaza Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga. T. 2* [Atlas of oil and gas fields in Khanty-Mansi Autonomous Okrug. Vol. 2]. Tyumen, Khanty-Mansiysk, IzdatNaukaCervis Publ., 2013. 308 p. (In Russ.).

2. Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Gornostalev D.I. [Mathematical substantiation of pulsed electromagnetic soundings for new problems of petroleum geophysics]. *Sibirskiy zhurnal vychislitelnoi matematiki – Numerical analysis and applications*, 2021, no. 2, pp. 179–192. (In Russ.).

3. Epov M.I., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., et al. [New method of impulsive electromagnetic logging sounding: mapping of the Bazhenovskaya Formation from Jurassic reservoirs penetrated by inclined-horizontal wells]. *Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Sibiri – Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2021, no. 3 (47), pp. 31–39. (In Russ.).

4. Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Epov M.I., et al. [Development of a Pulsed Electromagnetic Sounding Method for Studying the Bazhenov Formation]. *Saint Petersburg – 2020. Geosciences: Converting Knowledge into Resources (Saint Petersburg, Russia, 6–9 April 2020)*. Saint Petersburg, 2020. – pp. 1–5. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202053067>. (In Russ.).

5. 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.).

6. He Z., Yu G., Wang Z., et al. Advanced Progress of TFEM Method for Hydrocarbon Mapping. *2017 SEG International Exposition and Annual Meeting (Houston, Texas, USA, September 24–29, 2017)*. Document ID: SEG-2017-16928506.

7. Marsala A.F., Lyngra S., Safdar M., et al. Crosswell Electromagnetic Induction Between Two Widely Spaced Horizontal Wells: Coiled-tubing Conveyed Data Collection and 3D Inversion from a Carbonate Reservoir in Saudi Arabia. *2015 SEG Annual Meeting (New Orleans, Louisiana, USA, October 18–23, 2015)*. Document ID: SEG-2015-5891203.

8. Hoversten G.M., Schwarzbach C. Monitoring Hydraulic Fracture Volume using Surface to Borehole EM and Conductive Proppant. *2018 SEG International Exposition and Annual Meeting (Anaheim, California, USA, October 14–19, 2018)*. Document ID: SEG-2018-2984673.



9. Kaputerko A., Alumbaugh D., Levesque C. A Modeling Comparison of Two Crosswell EM Systems for Water Flood Monitoring in Horizontal Wells. *2009 SEG Annual Meeting (Houston, Texas, USA, October 25–30, 2009)*. Document ID: SEG-20090888.

10. Abubakar A., Liu J., Habashy T., et al. Three-dimensional Multiplicative-regularized Non-linear Inversion Algorithm for Cross-well Electromagnetic and Controlled-source Electromagnetic Applications. *2008 SEG Annual Meeting (Las Vegas, Nevada, USA, November 9–14, 2008)*. Document ID: SEG-2008-0584.

11. Glinskikh V., Gornostalev D., Mikhaylov I., et al. Transient Electromagnetic Soundings for Mapping the Spatially Heterogeneous Bazhenov For-

mation. *82nd EAGE Conference and Exhibition 2020 (Amsterdam, The Netherlands, December 8–11, 2020)*. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202011531>.

12. Wilt M., Zhang P., Safdar M. Crosswell Electromagnetic Tomography in Unconventional Well Geometries. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (Denver, Colorado, USA, October 30 – November 2, 2011)*. Document ID: SPE147152-MS.

13. Zeng S., Dong Q., Chen J. A Novel Casing Antenna System for Crosswell Electromagnetic Telemetry in Pad Drilling. *SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference (Austin, Texas, USA, July 24–26, 2017)*. Document ID: URTEC-2668280-MS.

© М. И. Эпов, В. Н. Глинских, М. Н. Никитенко,
К. В. Сухорукова, А. М. Петров, Д. И. Горносталев,
И. В. Михайлов, 2022