Оригинальная статья / Original article
УДК 550.837.82
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-2-65-79

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТА ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ МЕТОДА ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ДЛЯ ПРОГНОЗА РАПОНАСЫЩЕННЫХ ЗОН С АНОМАЛЬНО ВЫСОКИМ ПЛАСТОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ В КАРБОНАТНЫХ МЕЖСОЛЕВЫХ КОЛЛЕКТОРАХ В РАЗРЕЗЕ НИЖНЕГО КЕМБРИЯ ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

© А.И. Ильин[a], А.Г. Вахромеев[b], С.А. Сверкунов[c], И.В. Буддо[d], Ю.А. Агафонов[e], С.В. Компаниец[f], А.С. Смирнов[g], И.В. Горлов[h], Н.Н. Мартынов[i]

[a,d,e,f]АО «Иркутское электроразведочное предприятие»,
Российская Федерация, 664011, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а.
[b,c,d]Институт земной коры СО РАН,
Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.
[g,h]ООО «Газпром геологоразведка»,
Российская Федерация, 625000, г. Тюмень, ул. Герцена, 70.
[b,i]Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
[g]Тюменский индустриальный университет,
Российская Федерация, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

[a]Ильин Антон Игоревич, ведущий геофизик, e-mail: iai@ierp.ru
Anton I. Ilyin, Leading Geophysicist, e-mail: iai@ierp.ru
[b]Вахромеев Андрей Гелиевич, доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры нефтегазового дела ИРНИТУ, заведующий лабораторией ИЗК СО РАН, e-mail: andrey_igp@mail.ru
Andrey G. Vakhromeev, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering of INRTU, Head of the Laboratory at the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, e-mail: andrey_igp@mail.ru
[c]Сверкунов Сергей Александрович, инженер лаборатории геологии нефти и газа, e-mail: dobro_75@mail.ru
Sergey A. Sverkunov, Engineer of the Laboratory of Oil and Gas Geology, e-mail: dobro_75@mail.ru
[d]Буддо Игорь Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер ИЗК СО РАН, заместитель главного геофизика АО «Иркутское электроразведочное предприятие», e-mail: biv @ierp.ru
Igor V. Buddo, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Leading Engineer at the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Deputy Chief Geophysicist at Irkutsk Electroprospecting Company JSC, e-mail: biv@ierp.ru
[e]Агафонов Юрий Александрович, кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: aua@ierp.ru
Yuri A. Agafonov, Candidate of technical sciences, CEO, e-mail: aua@ierp.ru
[f]Компаниец Софья Викторовна, ведущий геофизик, e-mail: ksv@ierp.ru
Sofya V. Kompaniets, Leading Geophysicist, e-mail: ksv@ierp.ru
[g]Смирнов Александр Сергеевич. кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела ООО «Газпром геологоразведка», доцент кафедры прикладной геофизики ТИУ, e-mail: a.smirnov@ggr.gazprom.ru
Aleksandr S. Smirnov, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Head of the Subdivision of Gazprom Geologorazvedka LLC, Associate Professor of the Department of Applied Geophysics of Tyumen Industrial University, e-mail: a.smirnov@ggr.gazprom.ru
[h]Горлов Иван Владимирович, заместитель начальника Инженерно-технического центра по геологическим проектам, e-mail: i.gorlov@ggr.gazprom.ru
Ivan V. Gorlov, Deputy Head of the Engineering and Technical Center for Geological Projects, e-mail: i.gorlov@ggr.gazprom.ru
[i]Мартынов Николай Никитович, аспирант, e-mail: martynovkoma@gmail.com
Nikolay N. Martynov, Postgraduate student, e-mail: martynovkoma@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Цель. В статье рассматривается способ прогнозирования рапонасыщенных зон с аномально высоким пластовым давлением в межсолевых карбонатных коллекторах в разрезе нижнего кембрия юга Сибирской платформы по данным метода зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). **Методы**. На основе данных ЗСБ определяются сопротивление и проводимость горных пород, слагающих разрез. **Результаты.** Сопоставление результатов бурения поисковых и разведочных скважин и результатов ЗСБ показывает, что латеральный градиент геоэлектрических параметров позволяет оконтуривать потенциально опасные раонасыщенные зоны. **Выводы.** Построены карты продольной проводимости, сопротивления и карты градиента сопротивления, проводимости бельской свиты нижнего кембрия и определены критерии выделения градиентных зон, связанных с межсолевыми карбонатными рапонасыщенными коллекторами.
Ключевые слова: *Ковыктинское газоконденсатное месторождение, межсолевой карбонатный коллектор, рапа, аномально высокое пластовое давление, зондирование становлением поля в ближней зоне, продольная проводимость, продольное сопротивление, градиент, прогноз зон аномально высокого пластового давления.*

Информация о статье. Дата поступления 24 ноября 2017 г.; дата принятия к печати 4 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 29 июня 2018 г.

Формат цитирования. Ильин А.И., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Компаниец С.В., Смирнов А.С., Горлов И.В., Мартынов Н.Н. Применение градиента геоэлектрических параметров горных пород по данным метода зондирования становлением поля в ближней зоне для прогноза рапонасыщенных зон с аномально высоким пластовым давлением в карбонатных межсолевых коллекторах в разрезе нижнего кембрия юга Сибирской платформы // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 2. С. 65–79. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-65-79

APPLICATION OF ROCK GEOELECTRIC PARAMETER GRADIENT BASED ON NEAR-FIELD TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDING DATA TO PREDICT BRINE-SATURATED OVERPRESSURED ZONES IN CARBONATE INTRASALT RESERVOIRS IN THE SECTION OF LOWER CAMBRIAN RESERVOIRS OF THE SOUTH OF THE SIBERIAN PLATFORM

© A.I. Ilyin, A.G. Vakhromeev, S.A. Sverkunov, I.V. Buddo, Yu.A. Agafonov, S.V. Kompaniets, A.S. Smirnov, I.V. Gorlov, N.N. Martynov

Irkutsk Electroprospecting Company JSC,
2a Rabochaya St., Irkutsk 664011, Russian Federation
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation
Gazprom geologorazvedka LLC,
70 Gertsen St, Tymen 625000, Russian Federation
Irkutsk National Research Technical University
83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russian Federation
Tyumen Industrial University,
38 Volodarsky St., Tymen 625000, Russian Federation

ABSTRACT. Purpose. The article deals with the forecasting method of brine-saturated zones with the abnormally high formation pressure (AHFP) in intrasalt carbonate reservoirs in the section of the lower Cambrian of the South of the Siberian platform according to the data of the near-field transient electromagnetic sounding. **Methods**. The method of near-field transient electromagnetic (TEM) sounding is used to determine the resistivity and conductivity of rocks composing the section. **Results**. Comparison of the results of prospect and exploration well drilling and the results of near-field transient electromagnetic sounding shows that the lateral gradient of geoelectric parameters allows to delineate potentially dangerous brine-saturated zones. **Conclusions**. The maps of longitudinal conductivity/resistivity as well as the maps of the resistivity/conductivity gradient of Belskaya suite of the lower Cambrian have been compiled. The criteria for the identification of gradient zones associated with the intrasalt carbonate brine-saturated reservoirs collectors have been determined.

Keywords: *Kovykta gas condensate field, intrasalt carbonate reservoir, brine, abnormally high reservoir pressure, near-field transient electromagnetic (TEM) sounding, longitudinal conductivity, longitudinal resistivity, gradient, prediction of overpressured zones*

Article info. Received 24 November 2017; accepted for publication 4 June 2018; available online 29 June 2018.

For citation. Ilyin A.I., Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., Kompaniets S.V., Smirnov A.S., Gorlov I.V., Martynov N.N. Application of rock geoelectric parameter gradient based on near-field transient electromagnetic sounding data to predict brine-saturated overpressured zones in carbonate intrasalt reservoirs in the section of lower Cambrian reservoirs of the south of the Siberian platform. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 65–79. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-65-79. (In Russian).

Введение

Ковыктинское газоконденсатное месторождение (ГКМ) является одной из важнейших кладовых углеводородного сырья не только в Восточной Сибири, но и в России, имеющей стратегическое значение в рамках создания и развития Иркутского центра газодобычи. В 1986 г. была пробурена скважина 281-Ковыктинская, несколько позднее – скважина 1-Ковыктинская. Обе скважины дали приток газа дебитом около 100 тыс. м^3/сут. Тем самым было заявлено об открытии Ковыктинского ГКМ. Несмотря на относительно удобное географическое положение Ковыктинское ГКМ характеризуется крайне сложными геологическими условиями.

В период с 1987 по 2017 гг. на Ковыктинском и соседних Чиканском, Хандинском и Южно-Усть-Кутском участках пробурено 88 параметрических, поисковых, разведочных и эксплуатационных скважин. Многие скважины дали промышленные притоки газа из парфеновского горизонта, на баланс поставлены запасы в объеме 2,5 трлн м^3, что относит Ковыктинское ГКМ к категории гигантских месторождений. Из общего количества скважин не достигли проектного горизонта по геологическим причинам восемь скважин, что составляет около 10 % от общего количества. Основной причиной аварийных ситуаций является незапланированное вскрытие фонтанирующих рапонасыщенных зон с аномально высоким пластовым давлением (АВПД). Зоны с несовместимыми условиями бурения приурочены к межсолевым карбонатным флюидонасыщенным горизонтам.

Межсолевые карбонатные горизонты выделяются в литвинцевской, ангарской, бельской и усольской свитах. Необходимость перекрытия рапопроявляющих горизонтов приводит к серьезным потерям диаметра бурового ствола, причем даже использование тяжелой конструкции скважин не дает гарантии успешного безаварийного вскрытия подсолевых отложений. В северо-восточной части Ковыктинского ГКМ располагаются скважины 3, 18, 52, 60, 61, 64, в которых в процессе бурения были зафиксированы притоки рапы с АВПД из ангарской, булайской, бельской свит и верхов усольской свиты нижнего кембрия. В скважинах 52, 60, 61, 64 из христофоровско-балыхтинского резервуара получены мощные фонтаны рапы с минерализацией до 500–600 г/л при плотности до 1,40–1,42 г/см^3. Вместе с рапой из скважин 52 и 64 поступал газ. Расчетные пластовые давления оцениваются на уровне 47–49 МПа, коэффициент аномальности *Ка* составляет 2,1–2,3. Природные флюидонасыщенные резервуары нижнего кембрия, обладающие подобными характеристиками, получили название аномальных коллекторов [1].

Подходы к прогнозированию зон аномальных коллекторов

Геологический разрез Ковыктинского ГКМ представлен тремя комплексами осадочных горных пород, каждый из которых характеризуется своими естественными свойствами и состоянием, которые определяют горно-геологические условия. Важнейшими факторами этих условий являются пластовые (поровые) давления флюида, прочность скелета горных пород, температура, литологический состав, наличие пластовых флюидов, тип коллекторов [2]. Эти факторы существуют объективно и являются неуправляемыми, поэтому актуальность прогноза горно-геологических условий до начала бурения скважины весьма высока.

Особенностью месторождения является то, что горно-геологические условия – пластовое давление, пористость и проницаемость пород, тип насыщающего пластового флюида – весьма сильно различаются в пределах месторождения, оказывая значительное влияние на выбор систем его разработки. В разрезе скважин имеются пласты, содержащие коррозионно-активные флюиды, в том числе и сероводород.

В целом проблема прогноза зон АВПД в России и в мире является животрепещущей. Проявления пластовых флюидов с АВПД встречены практически во всех нефтегазоносных провинциях России и мира [3]. Данной тематике посвящены работы многих ученых и исследователей. Все существующие и описанные в литературе методики прогнозирования зон АВПД в геологическом разрезе опираются на представление об уплотнении глин в разрезе, изменении их упругих и электрических характеристик [4], то есть прогнозирование горно-геологических условий в галогенно-карбонатном разрезе является достаточно молодой и развивающейся темой. По сути, на сегодняшний день не существует общепризнанной методики для прогнозирования зон АВПД. При прогнозировании зон АВПД в терригенных отложениях нашли применение методы скважинной электрометрии и сейсморазведка[1]. Остальные геофизические методы для прогноза зон АВПД исследователями серьезно не рассматривались [5].

В геологических условиях юга Сибирской платформы для прогноза горно-геологических условий бурения нашли применение геофизические методы, в основном несейсмические, которые ранее считались неинформативными для данных целей. Для прогноза зон аномальных коллекторов с АВПД на территории Ковыктинского ГКМ применялись различные геолого-геофизические подходы: анализ фактических условий бурения, широкий спектр геофизических исследований (сейсморазведка, магниторазведка, гравиразведка, электроразведка в модификациях МТЗ, ЧЗ-ВП и ЗСБ).

Локальные зоны аномального флюидонасыщенного коллектора с АВПД (АК-АВПД) достаточно четко проявляются в геофизических полях. По данным электроразведки им соответствуют аномалии проводимости в интервалах литвинцевской, ангарской, булайской, бельской и усольской свит, полимодальность распределения проводимости комплексов [6]. По данным сейсморазведки зоны аномальных коллекторов характеризуются повышенными значениями коэффициента аномальности по данным анализа резонансного затухания сейсмических волн [1]. Локальные отрицательные аномалии поля силы тяжести интенсивностью до первых мГал отражают зоны аномальных коллекторов по данным гравиметрии.

---

[1] Методические указания по прогнозу и оценке аномально-высоких пластовых давлений. Л.: ВНИГРИ, 1987. 135 с. / Methodical instructions on the forecast and evaluation of abnormally high reservoir pressures. L.: VNIGRI, 1987. 135 p.

ISSN print 2541-9455
ISSN online 2541-9463

В силу сложившейся в геологоразведочной отрасли ситуации из всех перечисленных методов, пожалуй, только сейсморазведка и электроравзедка ЗСБ показали наиболее достоверные результаты. Для прогнозирования опасных зон с помощью сейсморазведки требуется применение специальных процедур обработки. В методе ЗСБ зоны аномальных коллекторов в некоторых случаях могут выделяться уже на качественном уровне, и достоверность прогноза зависит главным образом от точности структурного каркаса геоэлектрической модели и плотности наблюдений.

Методика исследований зондирования становлением поля в ближней зоне

На Ковыктинском ГКМ из методов электроразведки для прогноза горно-геологических условий бурения в основном применение нашел метод ЗСБ: метод электромагнитных зондирований с импульсным контролируемым источником, основанный на изучении поля переходных процессов, которое возбуждается в геологической среде при изменении тока в источнике [7]. В отличие от остальных методов зондирований в ЗСБ кажущееся сопротивление и сигнал связаны обратной зависимостью. Чем более проводящим является разрез, тем более мощные вихревые токи в нем возникают и формируют полезный сигнал.

Электроразведочные работы методом ЗСБ проводились на территории Ковыктинского участка по сети профилей, на площадках аварийных скважин, вскрывших высокодебитные фонтанные зоны аномальных коллекторов, и площадках проектных скважин. Первые электроразведочные работы с целью изучения зон АВПД были проведены в 1994–1995 гг. в районе скважины 18. Затем были проведены исследования в районе аварийных скважин 52, 60, 61, 64, в рамках профильных работ на ряде разведочных скважин, а также на площадках проектных скважин. Всего за годы исследований было выполнено более 10000 зондирований ЗСБ, площадными работами 3D-ЗСБ покрыто около 700 км^2.

Работы методом ЗСБ проводились с использованием цифровой телеметрической электроразведочной станции SGS-TEM [8]. При проведении работ на территории Ковыктинского ГКМ были применены методики профильных, веерных и площадных наблюдений (рис. 1). В качестве источника электромагнитного поля использовались незаземленные петли со стороной 500 либо 600 м, максимальная сила тока в источнике составляла 150–170 А. Использовались приемные петли со стороной 18 м, 25–30 витков. Шаг по площади работ составил 500 м при профильных работах и 300–450 м при площадных работах, шаг между источниками – от 1200 до 2500 м.

Результатом работ ЗСБ являются карты и разрезы геоэлектрических параметров: продольного сопротивления (удельного электрического сопротивления (УЭС)) и проводимости горных пород. Результатами площадных работ являются кубы геоэлектрических параметров.

Геоэлектрические критерии выделения рапонасыщенных коллекторов с аномально высоким пластовым давлением

С момента открытия Ковыктинского ГКМ накоплена значительная статистическая база геолого-геофизических материалов и данных бурения, включающая скважины Ковыктинского ГКМ и прилегающих территорий. Имеющиеся данные позволяют определить связь значений сопротивления и проводимости геоэлектрических горизонтов с вероятностью проявления осложнений в процессе бурения.

Полученные результаты о распределении геоэлектрических параметров – удельного электрического сопротивления

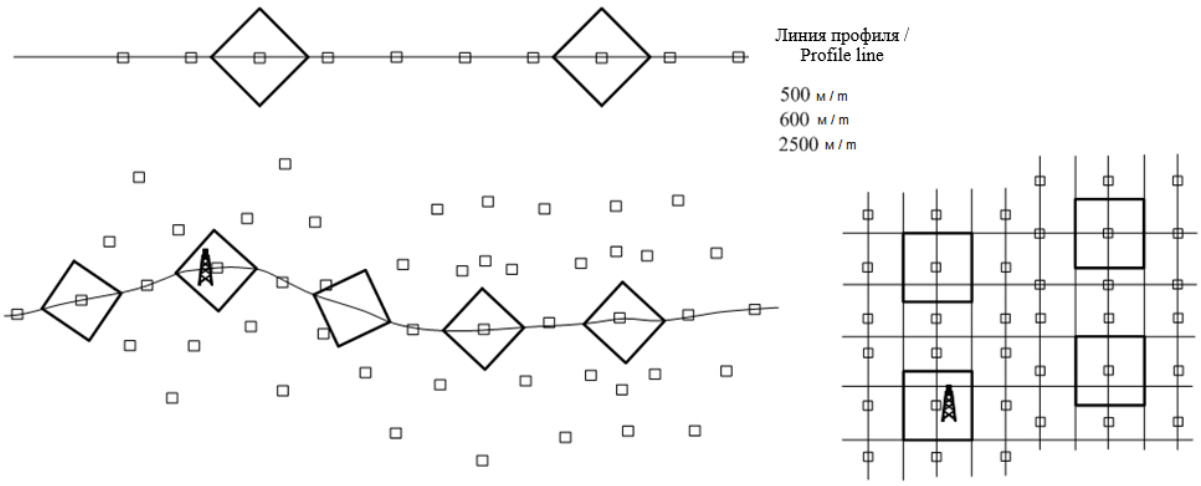

Рис. 1. Схемы установок зондирования становлением поля в ближней зоне, применяемые при работах на Ковыктинском газоконденсатном месторождении
Fig. 1. Schemes of TEM installations applied under development of Kovykta gas condensate field

и проводимости горных пород в разрезе – в сопоставлении с данными бурения, геофизических исследований скважин, геолого-технологических исследований и сейсморазведки позволили выработать геоэлектрические критерии наличия флюидонасыщенных горизонтов-коллекторов в системе природных резервуаров кембрия. Полученные критерии были применены для прогноза условий бурения проектных скважин, достоверность прогноза подтверждена результатами бурения [9].

Статистическая выборка значений проводимости и результатов бурения скважин показывает связь между проводимостью интервала горных пород и характером насыщения коллектора. Проанализировав материалы бурения скважин и электроразведочных работ, проводившихся на Ковыктинском ГКМ, сопоставив скважины с проявлениями, поглощениями, с притоками и без притоков со значениями проводимости по данным ЗСБ, была выработана методика прогноза условий бурения скважин с помощью электромагнитных зондирований. Она заключается в выделении в разрезе Ковыктинского ГКМ контрастных по отношению к вмещающим породам проводящих зон. Выделенные зоны отличаются определенным характерным набором признаков. Как правило, рапоносные зоны характеризуются повышенной проводимостью, локальностью аномалий и градиентными зонами изменения геоэлектрических свойств.

Основные геоэлектрические критерии прогноза зон АВПД:

– зоны рапонасыщенного сложного карбонатного коллектора четко локализованы и контрастны по геоэлектрическим характеристикам;

– значения проводимости более 1–1,5 См свидетельствуют о флюидонасыщенности емкостного пространства в карбонатных породах.

Данные критерии были определены после проведения первых электроразведочных работ ЗСБ на скважинах 3 и 18, а затем подтверждены еще на ряде скважин.

Последующие электроразведочные исследования на территории Ковыктинского месторождения показали, что существующие критерии не могут однозначно охарактеризовать наличие зоны АВПД во флюидонасыщенных карбонатных горизонтах-коллекторах.

В 2000 г. были проведены работы методом веерных ЗСБ (см. рис. 1) в районе скважины 60, расположенной в се-

веро-восточной части Ковыктинского участка, в которой из интервала христофоровкого горизонта был получен приток рапы интенсивностью 100 м^3/сут. и более. Коэффициент аномальности пластового давления составил 2,1.

В 2002 г. при проходке скважины 61 были встречены осложнения в интервалах ангарской, булайской и бельской свит. Из интервала атовского горизонта было зафиксировано рапопроявление интенсивностью 0,7 м^3/час. Расчетный коэффициент аномальности пластового давления флюида в атовском горизонте составил 2,1. В районе данной скважины также были выполнены профильные и веерные исследования методом ЗСБ (см. рис. 1).

По результатам работ на скважинах 60 и 61 были выделены аномалии проводимости в литвинцевской, ангарской, булайской и бельской свитах. Карты геоэлектрических параметров показали, что данные скважины располагались в зоне резкого изменения геоэлектрических свойств (рис. 2). Скважины располагаются в переходной зоне между низкими (менее 1 См) и высокими (до 5–6 См) значениями проводимости. Выделенные зоны получили название градиентных зон и стали рассматриваться как возможный прогнозный признак.

На первом этапе граничный уровень градиента проводимости, который мог бы использоваться в качестве прогнозного критерия, был определен простым графоаналитическим способом. На графике проводимости был отмечен уровень 1,5 См, который соответствовал наличию флюидонасыщенного коллектора. В соответствии с этим уровнем на графике градиента проводимости был также определен граничный уровень, составивший около 0,001 См/м. Однако формат профильных 2D электроразведочных работ и непредставительная статистика по сопоставлению скважин с осложнениями и значений градиента геоэлектрических параметров не позволяли уверенно утверждать о появлении нового численного прогнозного критерия. Для того чтобы подтвердить возможность применения данного критерия, было проведено синтетическое моделирование на основе петрофизических и геологических моделей карбонатных коллекторов.

Исходя из общих представлений, градиент – это векторная величина, характеризующая скорость изменения физического поля по направлению. Примерами использования градиента могут служить температурный градиент, вертикальный градиент силы тяжести и т. п. Градиент можно получить расчетным путем, в простейшем случае – как разность значений поля в двух точках, деленная на расстояние. В магниторазведке и гравиразведке непосредственное измерение градиента предпочтительнее при условии, что измеренный градиент более точен, чем расчетный [10]. Преимущества использования градиента перед использованием поля при решении геологических задач заключается в том, что градиент представляет собой производную поля в заданном направлении, быстрее убывает с увеличением расстояния от тела, создающего геофизическую аномалию. Поэтому локальные объекты проявляются на графиках и картах градиента более контрастно.

В нашем случае использование градиента геоэлектрических параметров идет от обратного. Как таковой градиент не измеряется, оценивается скорость изменения инверсионных геоэлектрических параметров на результативных картах, и тем самым выделяется поисковый объект.

Построение карт градиента проводимости проводилось с использованием специализированной программы, которая располагает богатым набором математических алгоритмов и фильтров для работы с любыми данными. Для

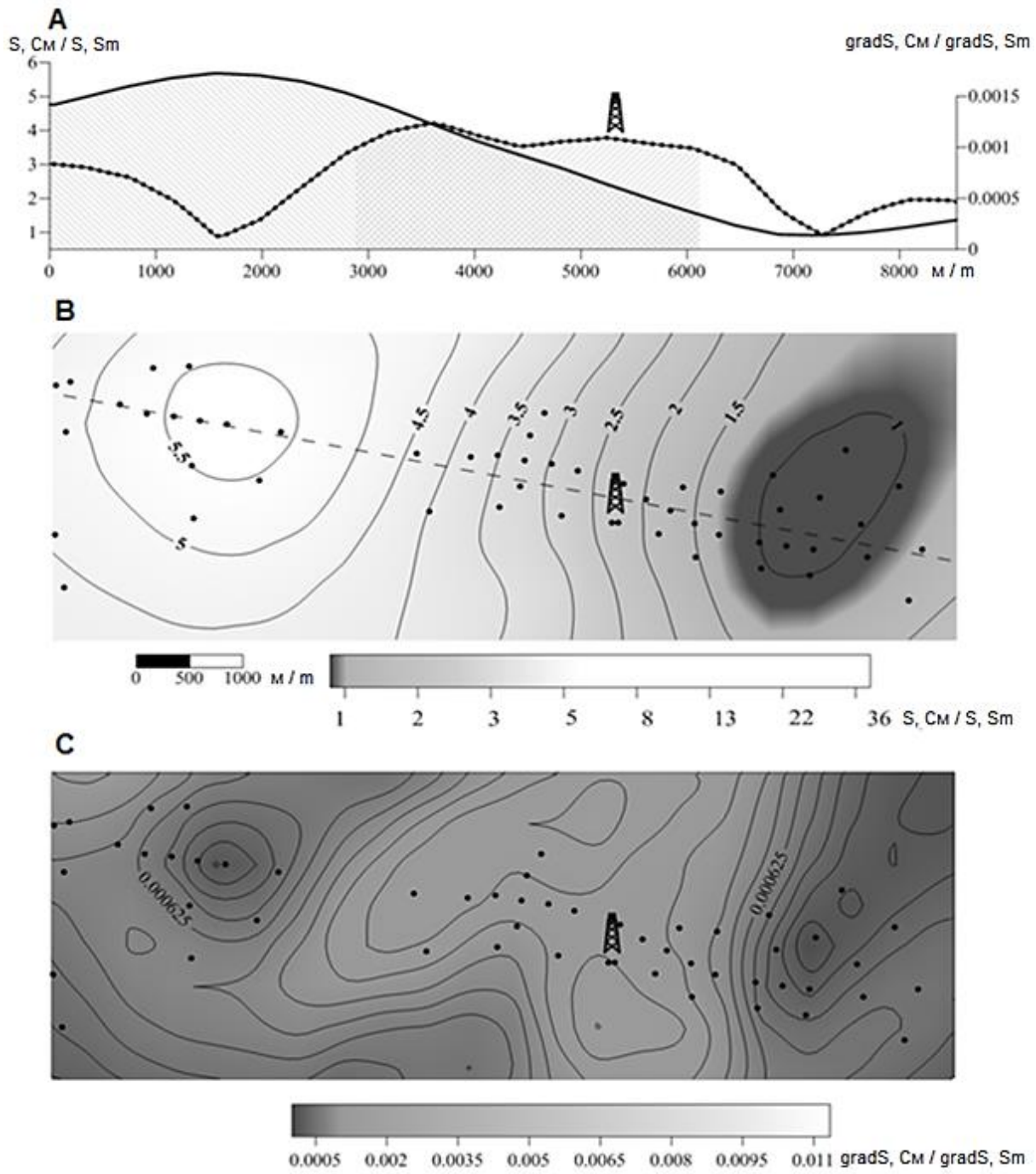

Рис. 2. Геоэлектрические характеристики бельской и булайской свит по данным 2D-зондирования становлением поля в ближней зоне:
А – графики проводимости и градиента проводимости; В – карта проводимости интервала булайской и бельской свит в районе рапопроявляющей скважины по данным 2D-ЗСБ; С – карта градиента проводимости интервала булайской и бельской свит в районе рапопроявляющей скважины по данным 2D-ЗСБ

Fig. 2. Geoelectrical characteristics of Belskaya and Bulaiskaya suites according to 2D TEM sounding data:
A – graphs of conductivity and conductivity gradient; B – map of the conductivity of the interval of Bulaiskaya and Belskaya suites in the area of brine manifesting well according to 2D TEM data; C – map of the conductivity gradient of the interval of Bulaiskaya and Belskaya suites in the area of brine manifesting well according to 2D TEM data

построения карт градиента геоэлектрических параметров применялась операция расчета градиента:

$$\left\|\vec{g}\right\| = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{dy}\right)^2}.$$

Операция расчета градиента создает сетку со значениями величин градиентов в каждой точке поверхности. Оператор градиента дает результат в тех же единицах измерения, что и исходная функция, нормированных на расстояние. Оператор градиента равен нулю для области постоянных значений, в геологическом трактовании это области отсутствия коллектора либо сплошного распространения коллектора с постоянными фильтрационно-емкостными свойствами. Градиент стремится к бесконечности, для переходных зон коллектор с рапой – не коллектор.

Геологическая модель аномального коллектора в градиентной зоне геоэлектрических параметров

Полученные на практике представления о градиенте изменения геоэлектрических свойств были подробно рассмотрены на основе физико-геологических моделей карбонатных горизонтов-коллекторов и результатах математического моделирования [11].

Межсолевые карбонатные пласты-коллекторы в условиях проявления соляной тектоники отличаются весьма изменчивыми фильтрационно-емкостными свойствами. Как правило, тип карбонатного коллектора трещинный, каверновый, трещинно-каверновый. В условиях пластического течения солей вследствие геодинамической напряженности геологического разреза в области шарьирования, в межсолевых карбонатных пластах формируются отдельные изолированные солями блоки карбонатных пород. При насыщении изолированного межсолевого карбонатного блока горных пород предельно насыщенными рассолами – рапой – часть горного давления передается на флюид, формируя АВПД. Рапа имеет минерализацию до 630 г/л, сопротивление флюида составит менее 0,01 Ом. Горные породы, насыщенные рапой, в электромагнитном поле представляются как аномальные контрастные объекты – проводники по сравнению с вмещающими практически не проводящими толщами солей [12]. По данным поисково-разведочного бурения изменчивость фильтрационно-емкостных свойств карбонатных межсолевых пластов-коллекторов в геологических условиях осадочного чехла юга Сибирской платформы весьма велика, граница между блоками рапонасыщенных пород-коллекторов может составлять от 4–5 км и менее до сотен метров.

Исходя из геологической модели поискового объекта, перед математическим моделированием сигналов ЗСБ ставилось три основные задачи:

– оценка возможности выделения карбонатных горизонтов-коллекторов относительно вмещающих пород;

– расчет погрешности восстановления геоэлектрической модели на зашумленных данных;

– использование полученных данных для комплексирования с результатами моделирования данных сейсморазведки.

На первом этапе формировались стартовые геоэлектрические модели и генерировались синтетические кривые ЗСБ. Расчет кривых производился путем решения прямой задачи электроразведки в рамках квазистационарной модели. Далее производилась автоматическая инверсия полученных данных для оценки погрешности восстановления геоэлектрической модели. Применялся алгоритм минимизации целевой функции, реализованный на основе метода Монте-Карло с элементами имитации отжига.

С целью снижения эквивалентности решений была применена регуляризация обратной задачи путем определе-

ния доверительного интервала поиска для каждого слоя модели. После инверсии производилась оценка расхождения полученного УЭС от стартового. Средняя погрешность восстановления геоэлектрических характеристик для христофоровско-балыхтинского резервуара составила 25 %.

Следующим шагом было зашумление синтетических кривых. Наличие обширной базы данных электромагнитных зондирований АО «Иркутское электроразведочное предприятие», полученной в пределах Ковыктинского ГКМ, позволило с высокой долей достоверности оценить уровень электромагнитных помех. После процесса зашумления выполнялась автоматическая инверсия по аналогичной методике. Погрешность восстановления геоэлектрических характеристик составила 33 % (рис. 3).

Проведенное моделирование отражает достаточно высокую точность восстановления геоэлектрических характеристик карбонатных горизонтов-коллекторов по данным работ 2D-ЗСБ. На зашумленных данных погрешность восстановления УЭС не превышает 30 %. Повысить точность определения геоэлектрических характеристик карбонатных горизонтов-коллекторов можно путем выполнения работ 3D-ЗСБ и комплексирования с данными сейсморазведки.

Результаты площадных электроразведочных работ 3D-зондирования становлением поля в ближней зоне

Карты сопротивления и проводимости, построенные по данным профильных и веерных работ ЗСБ, не позволяли в полной мере проанализировать и применять градиент геоэлектрических параметров как количественный прогнозный критерий при проведении геологической интерпретации электроразведочных работ. С внедрением в практику геологоразведочных работ на Ковыктинском ГКМ высокоплотных электроразведочных исследований методом ЗСБ, совмещенных с сетью сейсмических 3D-профилей, появилась возможность реализовать идею использования градиента геоэлектрических параметров как прогнозного критерия для выделения аномальных коллекторов (рис. 4).

Проведение площадных электроразведочных работ 3D-ЗСБ в 2016 г., охвативших площадки скважин 60 и 61, позволило провести более подробный анализ градиентных зон. Преимущество 3D-работ заключается в том, что еще на этапе полевых работ формируется плотная регулярная сеть пунктов наблюдений, позволяющая детально изучить распределение геоэлектрических свойств по латерали.

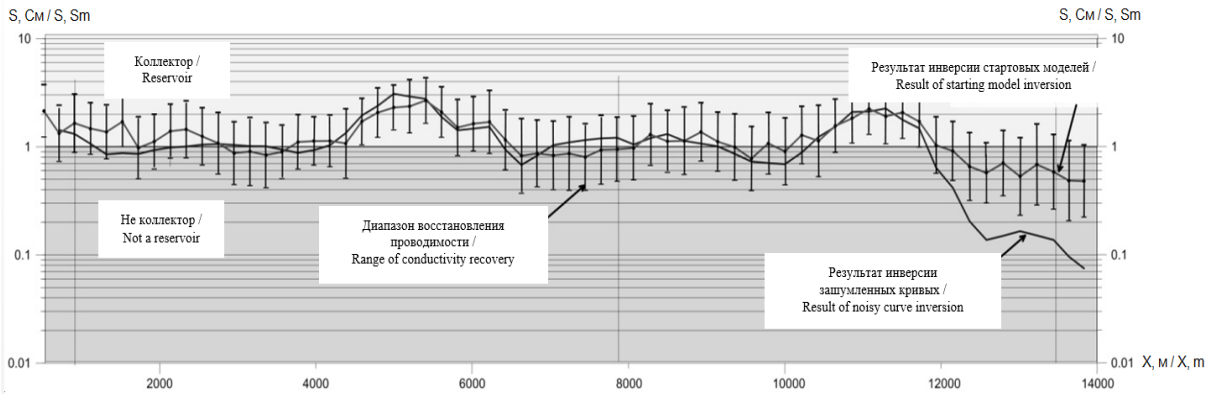

Рис. 3. Графики продольной проводимости стартовой и восстановленной моделей
Fig. 3. Graphs of longitudinal conductivity of starting and reconstructed models

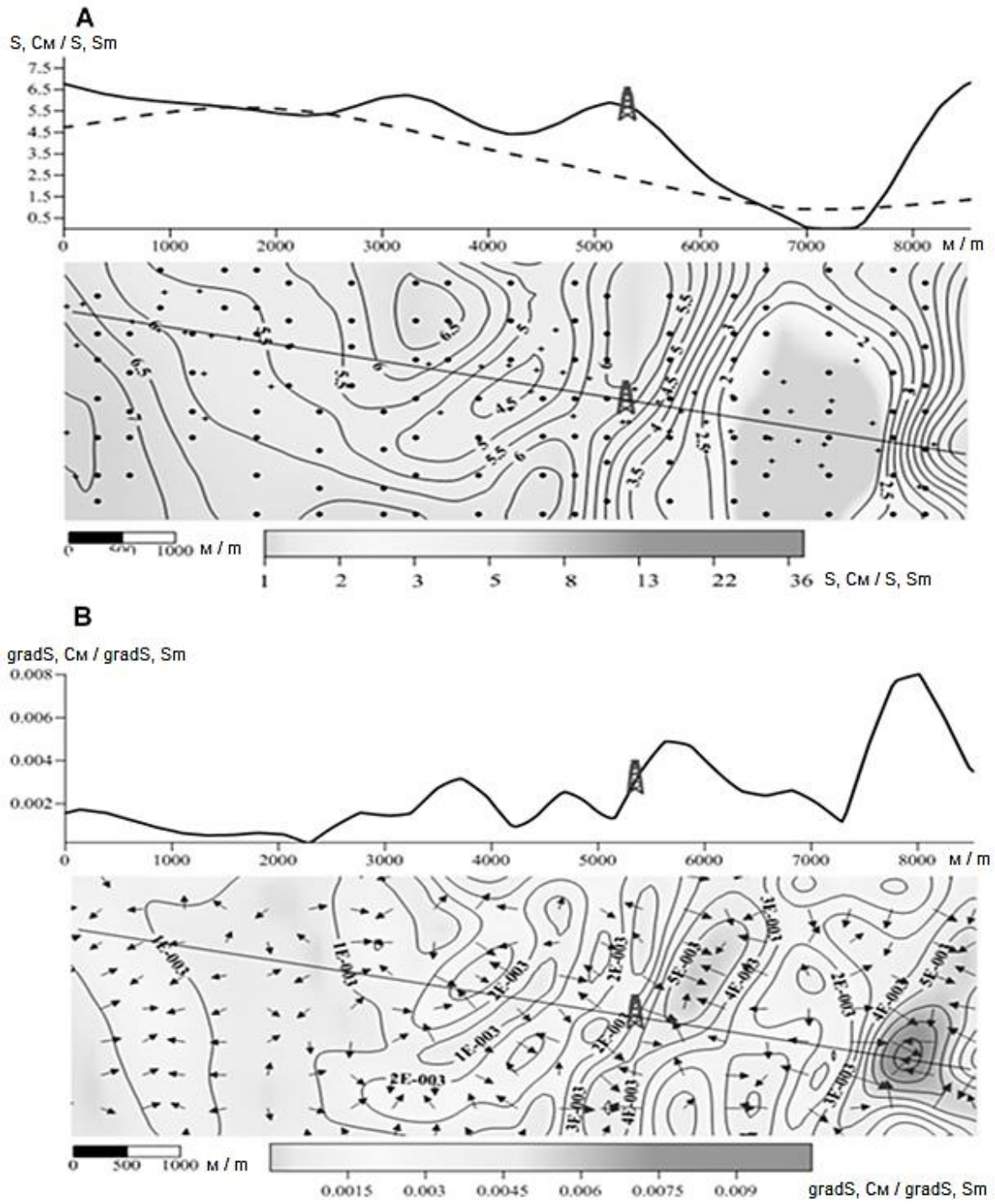

Рис. 4. Геоэлектрические характеристики бельской и булайской свит по данным 3D-зондирования становлением поля в ближней зоне:
А – графики проводимости по данным 2D- и 3D-ЗСБ и карта проводимости интервала булайской и бельской свит; В – график и карта градиента проводимости в районе рапопроявляющей скважины по данным 3D-ЗСБ

Fig. 4. Geoelectrical characteristics of Belskaya and Bulaiskaya suites according to 3D TEM sounding data:
A – graphs of conductivity according to 2D and 3D TEM sounding and the map of conductivity of the interval of Bulaiskaya and Belskaya suites; B – graph and the map of the conductivity gradient in the area of the brine manifesting well according to 3D TEM sounding data

По данным площадных электроразведочных работ скважина располагается в зоне изменения проводимости от 0,3 до 5 См на уровне интервала булайской и бельской свит. Сравнение графиков проводимости по данным 2D- и 3D-работ говорит о более детальном определении значений УЭС (см. рис. 4).

По новейшим представлениям рапопроявляющая скважина заложена на аллохтонном (надвинутом) крыле антиклинального вала, выделенного и закартированного в галогенно-карбонатной толще по данным сейсморазведки общей глубинной точки. Скважина располагается в контуре аллохтонной антиклинали, вне замка антиклинали (рис. 5). Эти представления говорят о распространении зон АВПД в региональном плане и могут быть выделены только при производстве площадных работ, затрагивающих площадь в тысячи квадратных километров.

В интервале бельской свиты галогенно-карбонатной толщи нижнего кембрия скважина вскрыла рапонасыщенный межсолевой карбонатный пласт-коллектор с АВПД. При рассмотрении геологической модели строения карбонатного коллектора в районе скважины видно локальное распространение аномальных коллекторов и приуроченность их к структурам подчиненного ранга. Наиболее отчетливо данные локальные

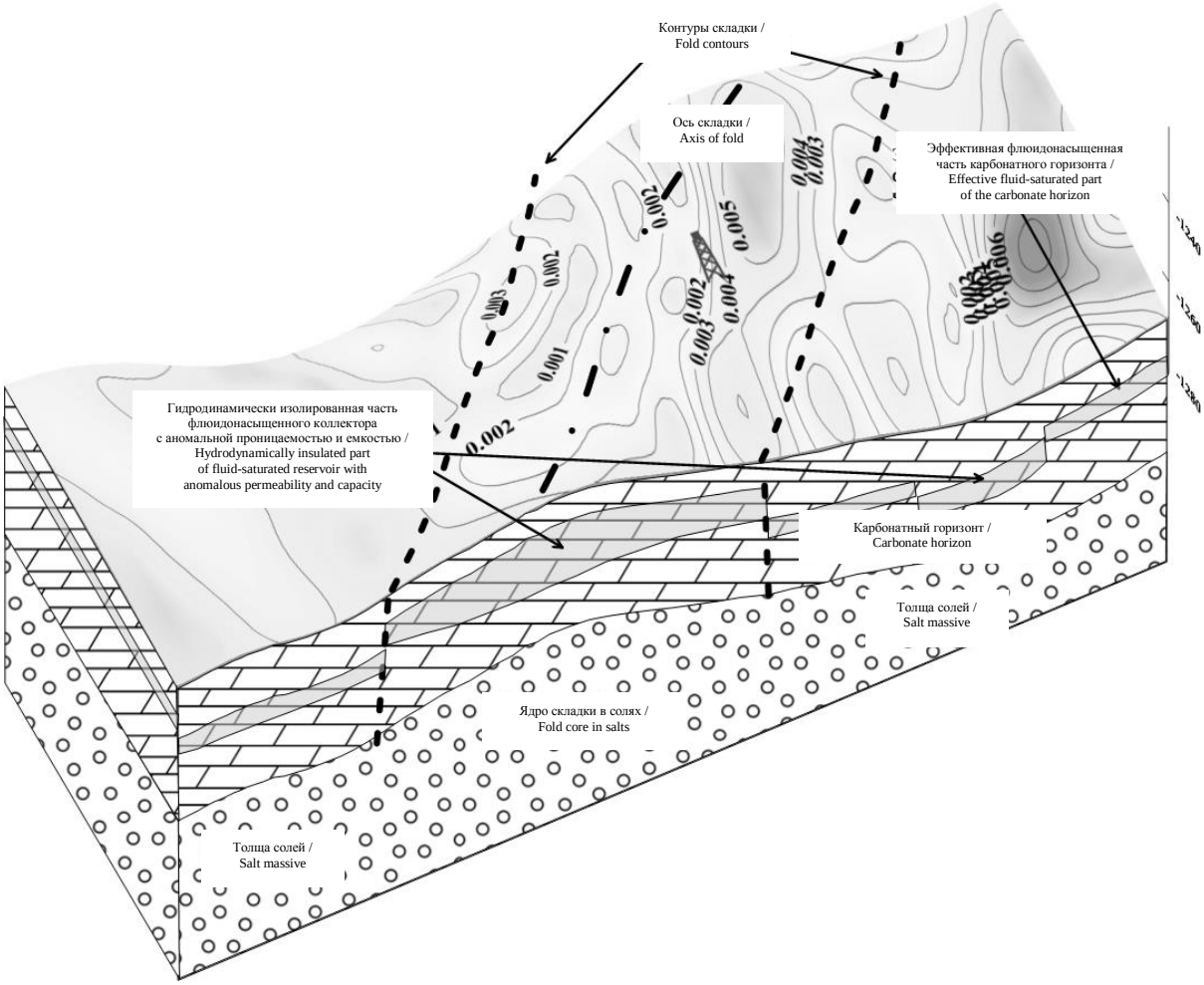

Рис. 5. Структурно-геоэлектрическая модель карбонатного флюидонасыщенного горизонта-коллектора по данным 3D-ЗСБ и 3D-сейсморазведки
Fig. 5. Structural-geoelectric model of the carbonate fluid-saturated reservoir horizon according to the data of 3D TEM sounding and 3D seismic exploration

зоны аномального рапоснасыщенного карбонатного коллектора в геоэлектрическом поле выделяются на карте градиента проводимости и оконтуриваются по значениям градиента проводимости 0,001 См/м. Таким образом, с помощью градиента проводимости картируется наиболее опасная зона локализации рапонасыщенного пласта-коллектора с АВПД в пределах присводовой и аллохтонной части линейной соляной антиклинали.

Выводы

Граница между блоками межсолевых рапонасыщенных карбонатных пластов-коллекторов с разными фильтрационно-емкостными свойствами в геоэлектрических параметрах отражается как переходная зона с резким изменением геоэлектрических свойств.

Градиент геоэлектрических параметров может успешно использоваться как прогнозный критерий для картирования зон АВПД.

Применять градиент геоэлектрических параметров в полной мере позволяют только результаты электроразведочных работ 3D-ЗСБ.

Библиографический список

1. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 248 с.

2. Калинин А.Г., Левицкий А.З., Никитин Б.А. Технология бурения разведочных скважин на нефть и газ: учебник для вузов. М.: Недра, 1998. 440 с.

3. Белонин М.Д., Славин В.И., Чилингар Д.В. Аномально высокие пластовые давления. Происхождения, прогноз, проблемы освоения залежей углеводородов / под ред. Н.С. Оконовой. СПб.: Недра, 2005. 324 с.

4. Chilingar G.V., Serebryakov V.A., Robertson J.O. Origin and prediction of abnormal formation pressures // Developments in Petroleum Science. Vol. 50. Amsterdam: Elsevier, 2002. 374 p.

5. Walter H. Fertl, Richard E. Cyapman, Rod F. Hotz. Studies in abnormal pressures // Developments in Petroleum Science. Vol. 38. Amsterdam: Elsevier, 1994. 473 p.

6. Агафонов Ю.А., Вахромеев А.Г. Новые геолого-геофизические подходы в прогнозе зон аномально высокого пластового давления на примере Орленгской структурной седловины // Геофизика на пороге третьего тысячелетия: сб. тр. IV Байкальской молодежной школы-семинара. Иркутск, 2004. С. 59–69.

7. Жданов М.С. Электроразведка: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 316 с.

8. Агафонов Ю.А., Поспеев А.В. Программно-измерительный комплекс для работ методом зондирования становлением поля в ближней зоне // Геофизический вестник. 2001. № 10. С. 8–11.

9. Ильин А.И., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Поспеев А.В., Горлов И.В. Пути прогноза горно-геологических условий бурения на Ковыктинском газоконденсатном месторождении // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 4 (57). С. 48–61.

10. Вахромеев Г.С. Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 192 с.

11. Shelohov I.A., Buddo I.V., Misiurkeeva N.V., Emelyanov V.S., Agafonov Y.A., Smirnov A.S., Gorlov I.V., Makarova A.V. Studies of carbonate reservoirs of the

Cambrian age of the Kovykta gas condensate field through the integration of the TEM and Seismic techniques. Saint Petersburg, 2018. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800225

12. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Кожевников Н.О. Выделение пластов-коллекторов в разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы по данным зондирований становлением электромагнитного поля в ближней зоне // Геофизика. 2010. № 6. С. 47–52.

References

1. Vakhromeev A.G. *Zakonomernosti formirovaniya i lokalizatsii mestorozhdenii promyshlennykh rassolov v karbonatnykh kavernovo-treshchinnykh rezervuarakh kembriya yuga Sibirskoi platformy* [Formation and localization regularities of industrial brine deposits in the carbonate cavernous-fracture reservoirs of the Cambrian in the south of the Siberian Platform.]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2015, 248 p. (In Russian).

2. Kalinin A.G., Levitskii A.Z., Nikitin B.A. *Tekhnologiya bureniya razvedochnykh skvazhin na neft` i gaz* [Technology of drilling exploratory wells for oil and gas]. Moscow: Nedra Publ., 1998, 440 p. (In Russian).

3. Belonin M.D., Slavin V.I., Chilingar D.V. *Anomal`no vysokie plastovye davleniya. Proiskhozhdeniya, prognoz, problemy osvoeniya zalezhei uglevodorodov* [Abnormally high reservoir pressures. Origin, forecast, development problems of hydrocarbon deposits]. Saint Petersburg: Nedra Publ., 2005, 324 p. (In Russian).

4. Chilingar G.V., Serebryakov V.A., Robertson J.O. Origin and prediction of abnormal formation pressures. Developments in Petroleum Science. Vol. 50. Amsterdam: Elsevier, 2002, 374 p.

5. Walter H. Fertl, Richard E. Cyapman, Rod F. Hotz. Studies in abnormal pressures. Developments in Petroleum Science. Vol. 38. Amsterdam: Elsevier, 1994, 473 p.

6. Agafonov Yu.A., Vakhromeev A.G. *Novye geologo-geofizicheskie podkhody v pro-gnoze zon anomal`no vysokogo plastovogo davleniya na primere orlengskoi strukturnoi sedloviny* [New geological and geophysical approaches in forecasting the zones of abnormally high reservoir pressure on example of the Orlengskaya structural anticline]. *Sbornik trudov IV baikal`skoi molodezhnoi shkoly-seminara "Geofizika na poroge tret`ego tysyacheletiya"* [Proceedings of IV Baikal Youth school-workshop "Geophysics in the beginning of the third millennium"]. Irkutsk, 2004, pp. 59–69. (In Russian).

7. Zhdanov M.S. *Elektrorazvedka* [Electrical prospecting]. Moscow: Nedra Publ., 1986, 316 p. (In Russian).

8. Agafonov Yu.A., Pospeev A.V. Software-measuring complex for near-field transient sounding. *Geofizicheskii vestnik* [Geophysical Bulletin], 2001, no. 10, pp. 8–11. (In Russian).

9. Il`in A.I., Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Pospeev A.V., Gorlov I.V. The ways to predict mining and geological conditions of drilling on the Kovykta gas-condensate field. *Izvestiya sibirskogo otdeleniya sektsii nauk o zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2016, no. 4 (57), pp. 48–61. (In Russian).

10. Vakhromeev G.S. Davydenko A.Yu. *Modelirovanie v razvedochnoi geofizike* [Modeling in exploration geophysics]. Moscow: Nedra Publ., 1987, 192 pp. (In Russian).

11. Shelohov I.A., Buddo I.V., Misiurkeeva N.V., Emelyanov V.S., Agafonov Y.A., Smirnov A.S., Gorlov I.V., Makarova A.V. Studies of carbonate reservoirs of the Cambrian age of the Kovykta gas condensate field through the integration of the TEM and Seismic techniques. Saint Petersburg, 2018. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800225

12. Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., Kozhevnikov N.O. Reservoir identification in the sedimentary cover of South of Siberian platform with the use of non-stationary electromagnetic soundings data. *Geofizika* [Russian Geophysics], 2010, no. 6, pp. 47–52. (In Russian).

Критерии авторства

Ильин А.И., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Компаниец С.В., Смирнов А.С., Горлов И.В., Мартынов Н.Н. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Ilyin A.I., Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., Kompaniets S.V., Smirnov A.S., Gorlov I.V., Martynov N.N. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.