

**TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDING IN 2D, 3D, AND 4D MODES:
SEQUENCE OF GEOLOGICAL EXPLORATION ACTIVITIES**I.V. Buddo ^{1,2,3✉}, I.A. Shelokhov ^{1,2}, N.V. Misyrkeeva^{1,2}, Y.A. Agafonov²

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

² SIGMA-GEO LLC, 6 Zvezdinskaya St, Irkutsk 664039, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russia

ABSTRACT. From 1980s, electromagnetic prospecting is an integral component of geophysical techniques for oil and gas exploration in many regions of the Russian Federation. Electromagnetic methods are used at all stages of geological exploration, including reconnaissance, discovery, prospecting and appraisal, and economic mining. In oil and gas exploration, the most commonly used technique is the near-field transient electromagnetic sounding (TEM). On the other hand, for each of these stages, specific tasks of electromagnetic prospecting have not been clearly defined yet. Furthermore, there are no standard requirements to the volume of a priori geological and geophysical information, which is sufficient for solving a geological problem. If such information is lacking or insufficient, a geological problem may be incorrectly stated and/or improperly correlated with the current stage of works.

Our study aims to define which geological problems should be addressed by electromagnetic survey at the different stages of geological exploration, and to specify the requirements to the availability of a priori geological and geophysical information. We have analyzed the electromagnetic data from the regions of East and West Siberia, which have different geological settings. The main geological problems that can be solved by the seismic and electromagnetic techniques are determined. We propose a set of geophysical survey operations, which is optimal for oil and gas exploration. An effective sequence of electromagnetic prospecting stages is determined, and preliminary and accompanying surveys are specified. The requirements to the availability of a priori information are proposed, and its volume is defined. Geological problems are defined with respect to the corresponding stages of geological exploration. Special attention is given to approaches to the mineral resource estimation and calculation of hydrocarbon reserves, taking into account electromagnetic survey results. It is proposed to use the electromagnetic data at the stage of prospecting and appraisal, which aims to assess the resources of categories D_1 and D_0 , as well as at the exploration stage for estimating the reserves of category C_2 in new and explored fields. Approaches to the economic assessment of using electromagnetic surveys as part of the geological exploration are discussed. Our study shows that a correct sequence of electromagnetic prospecting operations at each stage can ensure obtaining an original geological dataset of the given stage and thus providing a proper basis for the next stage of oil-gas field investigation.

KEYWORDS: electromagnetic exploration; seismic exploration; oil and gas; geological exploration; integration of geophysical methods; hydrocarbon reserves; economical assessment

FUNDING: In this study, we used the equipment of the Geodynamics and Geochronology Centre for Collective Use at the Institute of the Earth's Crust SB RAS (Grant 075-15-2021-682).

RESEARCH ARTICLE

Received: March 16, 2021

Revised: June 29, 2021

Accepted: July 12, 2021

Correspondence: Igor V. Buddo, biv@crust.irk.ru

FOR CITATION: Buddo I.V., Shelokhov I.A., Misyrkeeva N.V., Agafonov Y.A., 2021. Transient electromagnetic sounding in 2D, 3D, and 4D modes: sequence of geological exploration activities. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3s), 715–730. doi:10.5800/GT-2021-12-3s-0549

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ЗСБ 2D, 3D, 4D: ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПОСТАНОВКИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

И.В. Буддо^{1,2,3}, И.А. Шелохов^{1,2}, Н.В. Мисюркеева^{1,2}, Ю.А. Агафонов²

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² ООО «СИГМА-ГЕО», 664039, Иркутск, ул. Звездинская, 6, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

АННОТАЦИЯ. Электроразведка на протяжении десятков лет используется как неотъемлемая часть комплекса геофизических методов при проведении нефтегазопроисследовательских работ во многих регионах Российской Федерации. Методы электроразведки находят свое применение на всех этапах геологоразведочных работ: региональном, поисково-оценочном, разведочном и эксплуатационном. При решении нефтегазопроисследовательских задач наибольшее распространение получил метод электромагнитного зондирования становлением поля в ближней зоне. Вместе с тем до настоящего времени четко не определены конкретные задачи, решаемые электроразведкой на соответствующем этапе. Более того, отсутствуют единые требования к наличию априорной геолого-геофизической информации. Очевидно, что отсутствие или недостаточный объем такой информации может привести к некорректной постановке геологических задач и/или их несоответствию текущей стадии изучения участка работ.

Цель настоящего исследования – обоснование геологических задач, решаемых электроразведкой на соответствующем этапе геологоразведочных работ, а также требований к априорной геолого-геофизической информации. В ходе исследования были проанализированы результаты электроразведочных работ, полученные в различных геологических условиях Восточной и Западной Сибири. Определены основные геологические задачи, решаемые методами сейсмо- и электроразведки. Предложен оптимальный комплекс геофизических исследований при проведении нефтегазопроисследовательских работ, установлена оптимальная стадийность постановки электроразведки: опережающие и сопровождающие исследования. Выдвинуты требования к наличию априорной информации и предложены геологические задачи, соответствующие каждому этапу геологоразведочных работ. Рассмотрены подходы к оценке ресурсов и подсчету запасов углеводородов с учетом материалов электроразведки. Предложено использовать результаты электромагнитных исследований на поисково-оценочном этапе для подсчета ресурсов категорий D_1 и D_0 , а на разведочном – запасов категории C_2 на новых и разведываемых залежах. Рассмотрены подходы к экономической оценке привлечения электроразведки в комплекс геологоразведочных работ. Показано, что соблюдение корректной последовательности позволит на каждом этапе получать уникальную геологическую информацию, являющуюся базовой для последующей стадии изучения месторождений нефти и газа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электроразведка; сейсморазведка; геологоразведочные работы; комплексирование геофизических методов; нефть и газ; запасы углеводородов; экономическая оценка

ФИНАНСИРОВАНИЕ: В работе задействовано оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682.

1. ВВЕДЕНИЕ

Первые упоминания об электроразведке (ЭР) как методе изучения геологического разреза связывают с работами братьев Шлюмберже [Stefanescu, Schlumberge, 1930]. Начиная с этого времени происходит активное развитие теории (Л.Л. Ваньян, А.Н. Тихонов, G.V. Keller и др.), методологии (А.К. Захаркин, Н.О. Кожевников, А.В. Поспеев и др.), аппаратно-программных решений (К. Strack, Б.П. Балашов, С.М. Стефаненко, М.В. Шарлов и др.) электроразведочных методов. Выделяются методы, нацеленные на изучение как верхней части разреза (методы постоянного тока, зондирование становлением поля, георадар), так и глубинной структуры земной коры (методы переходных процессов (зондирования становлением поля), частотные и магнитотеллурические зондирования). Существуют

модификации методов электроразведки как для наземных, так и морских исследований [Chave et al., 1992; Constable, Srnka, 2007].

Применительно к отечественной нефтегазопроисследовательской электроразведке, методы электромагнитных зондирований активно применяются с 80-х гг. прошлого века. Наиболее показательна история применения электроразведки в Восточной Сибири, являющейся крайне сложным регионом для нефтегазопроисследовательских исследований. В работах [Bernshstein et al., 1977; Mandelbaum et al., 1983] было убедительно показано, что применение одной лишь сейсморазведки не позволяет эффективно выявлять месторождения нефти и газа в условиях высокоскоростного разреза, активного проявления тектоники, в т.ч. солевой, преимущественно неантиклинальных ловушек углеводородов (УВ), резко меняющейся

литологии и небольших эффективных мощностей горизонтов-коллекторов. В таких условиях необходимо комплексирование геофизических методов исследований [Vakhromeev, Davydenko, 1989]. В рамках данной парадигмы были проведены региональные исследования в пределах территории Восточной Сибири, подготовлен к дальнейшему изучению ряд объектов «аномалия типа залежь» (АТЗ), открыты крупные и уникальные месторождения нефти и газа: Верхнечонское, Среднеботуобинское, Ковыктинское, Ярактинское, Даниловское и др.

С развитием аппаратно-программных технологий удалось многократно повысить информативность результатов электромагнитных исследований [Sharlov, 2017], что позволило расширить область применения электроразведки с региональной на все стадии геологоразведочных работ (ГРП): поисково-оценочную, разведочную и эксплуатационную. Вместе с тем каждой стадии ГРП соответствует не только определенный комплекс методов электроразведки, но и методические особенности, в т.ч. различная геометрия сети наблюдения, зондирующей установки, параметры источника и приемников электромагнитного поля, подходы к обработке и интерпретации полученных материалов. Представляется, что проектирование ЭР-методов должно осуществляться в парадигме последовательного применения на всех стадиях ГРП – от региональной до эксплуатационной, что позволит оптимизировать стратегию изучения недр от поисков до разработки месторождений нефти и газа.

2. МЕТОД ЗСБ

Зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) – метод с импульсным контролируемым источником, основанный на изучении поля переходных процессов, которое возбуждается в земле при изменении тока в источнике [Kaufman, Morozova, 1970; Vanyan, 1997].

При полевых работах методом ЗСБ в качестве источника и приемника используются, как правило, многоэтажные установки с квадратными незаземленными петлями. К преимуществам ЗСБ относятся: высокая локальность исследований, значительная глубинность, низкая чувствительность к анизотропии разреза и приповерхностным неоднородностям, отсутствие гальванического заземления и, вследствие этого, возможность работы в различных природных условиях, в т.ч. в зимний период. Последнее особенно важно в условиях Сибири. К числу преимуществ метода следует отнести также возможность определения параметров разреза установками, размеры которых меньше глубины залегания исследуемых объектов.

По сравнению с другими методами электроразведки, использующими гальванический источник поля, или методами естественных электромагнитных полей, ЗСБ характеризуется наивысшей разрешающей способностью при изучении геоэлектрического разреза на глубину [Tabarovskiy et al., 1985].

Кроме этого, в условиях Сибирской платформы метод ЗСБ с магнитным источником, в силу горизонтальной поляризации поля, обладает значительным преимуществом, связанным с нечувствительностью к наличию в разрезе слоев высокого сопротивления, в частности пластов солей (их сопротивление составляет 50000–100000 Ом·м) или многолетнемерзлых пород (сопротивление порядка тысяч Ом·м).

3. ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ЗСБ

Применение электромагнитных методов для изучения геологического строения разреза базируется на петрофизической связи удельного электрического сопротивления горных пород с параметрами пористости, насыщения, структуры порового пространства, минерализации и температуры пластовых вод – зависимости Дахнова – Арчи (1) [Dakhnov, 1985]:

$$\rho_{н.п} = P_n \rho_{в.п}; \rho_{в.п} = P_n \rho_v; P_n = a K_n^{-m}; P_n = a K_v^{-n} \quad (1)$$

где P_n – электрический параметр пористости, P_n – параметр насыщения, a (показатель глинистости породы) и m (показатель цементации породы) – константы, которые определяют экспериментально для коллекции образцов, представляющей изучаемый геологический объект, K_n – коэффициент пористости, K_v – коэффициент водонасыщенности.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) водоносных коллекторов (песчаники и алевролиты) в зависимости от пористости породы и минерализации пластовой воды изменяется от 0.2 до 15.0–20.0 Ом·м и в среднем составляет 0.5–5.0 Ом·м. В случае гидрофильного продуктивного коллектора УЭС зависит от параметра влажности, коэффициента нефтегазонасыщения и изменяется в широких пределах от первых Ом·м до 100–200 Ом·м. УЭС пород-неколлекторов в терригенном разрезе изменяется в зависимости от пористости и, в меньшей степени, в связи с минерализацией пластовой воды от нескольких десятков до сотен Ом·м.

УЭС карбонатных пород неколлекторов составляет тысячи Ом·м ввиду присутствия известняков и доломитов. УЭС водоносных коллекторов несколько выше, чем у песчаников и алевролитов. УЭС продуктивных коллекторов изменяется в тех же пределах, что и в терригенном разрезе: от единиц Ом·м в тонкопористых мелоподобных известняках до сотен Ом·м в крупнопористых известняках и доломитах с высоким нефтенасыщением.

В работе [Rybalchenko et al., 2020b] показаны зависимости УЭС терригенного коллектора сеномана по ЗСБ от эффективных газонасыщенных толщин для условий Западной Сибири, а также продольной проводимости по ЗСБ от линейной емкости и насыщения терригенного коллектора венда для Восточной Сибири. Представленные материалы наглядно показывают высокую чувствительность электромагнитных зондирований к изменению емкостных свойств и насыщения коллектора.

4. МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА ЗСБ И СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ

В настоящее время наибольшее распространение в разрезе объемов работ получили: малоглубинные ЗСБ (мЗСБ), профильные ЗСБ 2D, площадные (веерные) ЗСБ по нерегулярной сети, площадные высокоплотные ЗСБ 3D и ЗСБ 4D по регулярной сети.

Физические основы всех вышеперечисленных модификаций одинаковы, однако существует ряд весьма значительных технологических отличий. Сравнительные параметры приведены в табл. 1 (веерные ЗСБ являются частным случаем ЗСБ 3D и отдельно не рассматриваются).

В случае плохо проводящего разреза (например, отложения палеозоя) максимальная глубина исследования ЗСБ может достигать 5–6 и более километров [Mishurkeeva et al., 2015].

Как видно из табл. 1, технологически модификации ЗСБ отличаются весьма значительно, что выдвигает повышенные требования к проектированию оптимального дизайна сети наблюдения (съёмки). В особенности, когда идет речь о постановке комплекса работ: сейсмо- и электроразведки, выполняющихся в один полевой сезон по совмещенной сети профилей [Rybalchenko et al., 2020b]. Вопрос выбора оптимальных параметров сети наблюдения освещен в работах [Zakharkin, 1981; Seminsky et al., 2014, 2019].

5. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ НА ВСЕХ ЭТАПАХ ГРП

В соответствии с [Temporary Regulation..., 2001; Mukhin, 2008], геологоразведочные работы на нефть и газ в зависимости от поставленных задач и состояния изученности недр подразделяются на региональный, поисково-оценочный и разведочный этапы.

Региональный этап делится на две стадии: прогноз нефтегазоносности и оценка зон нефтегазоаккумуляции. На первой стадии выделяют нефтегазоперспективные комплексы и зоны возможного нефтегазоаккумуляции, выполняют качественную и количественную оценку перспектив нефтегазоносности (D_2, D_1), а также выбирают основные направления дальнейших исследований. На второй стадии определяют наиболее крупные ловушки и уточняют нефтегазогеологическое районирование территории, проводят количественную оценку (D_1, D_2) и выбирают районы и очередность проведения на них поисковых работ.

Комплекс региональных геофизических исследований включает магнито-, грави-, сейсмо- и электроразведку. Из многочисленных методов электроразведки на региональном этапе применяются только два: магнитотеллурические зондирования (МТЗ) и зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). МТЗ применяется для изучения рельефа непроводящего основания до глубины 6–10 км и более. Метод ЗСБ же нацелен на детальное изучение геоэлектрических свойств разреза до глубины 3–4 км. Особенно актуально применение ЗСБ в условиях карбонатно-галогенного разреза, наличия эффузивов значительной мощности, разрезом, характерных для древних платформ.

Исследования проводят по совмещенной сети опорных профилей, расположенных в 10–50 км друг от друга. Причем в районах со сложным и весьма сложным геологическим строением, к которым относятся Ангаро-Ленская ступень, Непско-Ботуобинская антеклизы и Тунгусская синеклизы, плотность сети региональных профилей должна составлять не менее 0.5–1.0 км/км².

В случае наличия дорожной сети региональные электроразведочные работы целесообразно проводить

Таблица 1. Сравнительные технологические параметры мЗСБ, 2D-ЗСБ, 3D-ЗСБ и 4D-ЗСБ

Table 1. Comparison of technological parameters of sTEM, 2D TEM, 3D TEM, and 4D TEM

Метод	мЗСБ	2D-ЗСБ	3D-ЗСБ	4D-ЗСБ
Максимальная глубина исследования, м	500	4000	4000	4000
Сеть наблюдения, методика съёмки	Произвольная, возможен «пешеходный» вариант	Линейная, регулярная и нерегулярная	Высокоплотная, регулярная, сейсмопрофили 3D	Сгущенная сеть, регулярная, сейсмопрофили 3D, жесткое закрепление пунктов наблюдений на местности
Плотность сети наблюдения, ф.т./км ²	16–33	1–2	5–12	8–30
Длина стороны генераторной петли (ГП), м*	25–200	500–1200	500–1200	500–1200
Сила тока в ГП, А*	40	200–250	200–250	200–250
Аппаратура, параметры	FastSnap, 16, 24 bit	SGS-TEM, 32 bit	SGS-TEM, 32 bit	SGS-TEM, 32 bit
Кол-во единиц техники в отряде/партии, шт.	1	5	10	10

Примечание. * Размер стороны генераторной петли и сила тока зависят от требуемой глубины исследования, геоэлектрических особенностей разреза и специфики территории исследования (наличие инфраструктуры, рельеф, речная сеть и т.д.).

Note. * The size of a generator loop side and the amperage are determined for the required depth of investigation, geoelectric features of the section, and specifics of the study area, including its infrastructure, topography, river networks etc.

до выполнения сейсморазведки, что позволит оптимизировать сеть опорных профилей сейсморазведки методом общей глубинной точки, модификации метода отраженных волн (МОВ ОГТ). Комплексирование методов сейсмо- и электроразведки позволяет выделить крупные тектонические элементы земной коры, определить мощность осадочного чехла, изучить его региональное строение, а также протрассировать крупные разломы. По результатам проведенных исследований закладывают точки опорного и параметрического бурения [Temporary Classification..., 2001].

Ярким примером комплексирования методов электро- и сейсморазведки на региональном этапе ГРП могут служить исследования, проведенные в 2015 г. в пределах Алдано-Майской впадины [Misurkeeva et al., 2015] (рис. 1).

По результатам исследований, по резкой смене геоэлектрических параметров, что соответствует изменению геоэлектрического и, соответственно, геологического разреза, была закартирована зона сочленения Алданской впадины Алдано-Майского прогиба с восточным склоном Алданской антеклизы, определена граница выклинивания рифейских отложений. Выделенные проводящие интервалы в отложениях верхнего и среднего рифея могут свидетельствовать о присутствии зон улучшенных коллекторских свойств – перспективных объектах на нефть и газ.

Геологоразведочные работы на региональном этапе проводятся в соответствии с планом Федерального агентства по недропользованию (Роснедра) и за счет федерального бюджета. Необходимо отметить, что в настоящее время электроразведка является неотъемлемой частью комплекса геофизических исследований, проводящихся по заказу Роснедра в Восточной Сибири и других регионах Российской Федерации.

Последующие этапы ГРП на лицензионных участках (участках недр) проводятся недропользователями за счет собственных средств.

Поисково-оценочный этап подразделяется на стадии выявления, подготовки объектов к поисковому бурению, а также поиска и оценки месторождений (залелей).

По результатам проведения первой стадии оценивают прогнозные локализованные ресурсы D_n , тогда как на второй – выделяют перспективные ловушки с оценкой перспективных ресурсов категории D_0 . И здесь уже типовой комплекс работ включает детальную сейсмо- и электроразведку, а также высокоточную гравиразведку. Основные геологические задачи данного этапа сводятся к поиску зон структур и детализации строения отдельных локальных поднятий, зон стратиграфических несогласий, тектонических нарушений, зон выклинивания коллекторов и их фациального замещения. И здесь электроразведка применяется для решения задач структурной геологии, поисков отдельных локальных структур с амплитудами не менее 10–15 % от глубины залегания опорного горизонта, выявления и трассирования зон нарушений и т.д. Вместе

с тем в литературе [Nikonov, 2006] среди методов электроразведки упоминаются в основном методы теллурических токов (ТТ), вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), электропрофилирования, частотного зондирования (ЧЗ). В настоящее время метод ТТ практически полностью замещен более современным МТЗ, а ВЭЗ – как зондирование на постоянном токе – для нефтегазопроисковых исследований не применяется вовсе (в соответствии с геометрическим принципом зондирования глубина исследования зависит от разности установки, в силу чего изучение глубин более 300–500 м трудноосуществимо и экономически нецелесообразно). Методы постоянного тока были успешно заменены индукционными методами, наиболее широко применяемым из которых является ЗСБ.

По [Gabrielyants, 2000], электроразведка успешно используется для выявления и подготовки объектов в районах развития соленосных отложений, в частности в подсоловых отложениях. В условиях соляной тектоники в присводовых зонах куполов корреляция волн нарушается и крутые стенки куполов сейсморазведкой не прослеживаются. Вместе с тем УЭС соляных отложений на 2–3 порядка отличаются от вмещающих осадочных отложений, что позволяет надежно их картировать электроразведкой. Метод ЗСБ – индукционный, что позволяет изучать подэкранные (подсоловые) отложения, что особенно важно в районах, для которых характерно строение разреза из трех структурных этажей: подсолового, соленосного (галогеогенного), надсолового. В таких условиях применение комплекса сейсмо- и электроразведочных исследований позволяет значительно повысить эффективность поисково-оценочных работ.

Электроразведка может быть использована при выявлении и подготовке структурных ловушек, связанных с погребенными рифами: барьерными рифовыми системами, одиночными внешними рифами, одиночными шельфовыми органогенными постройками. Действительно, эффективность ЗСБ при оценке насыщения карбонатного рифа в осинском горизонте нижнего кембрия подтверждена в ходе проведения мониторинговых исследований (ЗСБ 4D), проведенных на одном из крупных нефтяных месторождений Иркутской области [Burdakov et al., 2020].

Выявление и подготовка неантиклинальных ловушек в терригенных отложениях – задача, актуальная для Восточной Сибири, где большая часть месторождений нефти и газа не относятся к структурному типу. В таких условиях электроразведка применяется для определения вещественного состава, выделения литофациальных комплексов, эрозионных врезов, оценки флюидонасыщения перспективных объектов.

По [Kamaletdinov et al., 1983], одной из важных геологических задач является поиск структур в складчатонадвиговых зонах. При изучении данных объектов отдается предпочтение комплексу методов, включающему МОГТ, гравиметрию, дистанционные методы. Вместе с тем результаты, полученные в последнее десятилетие

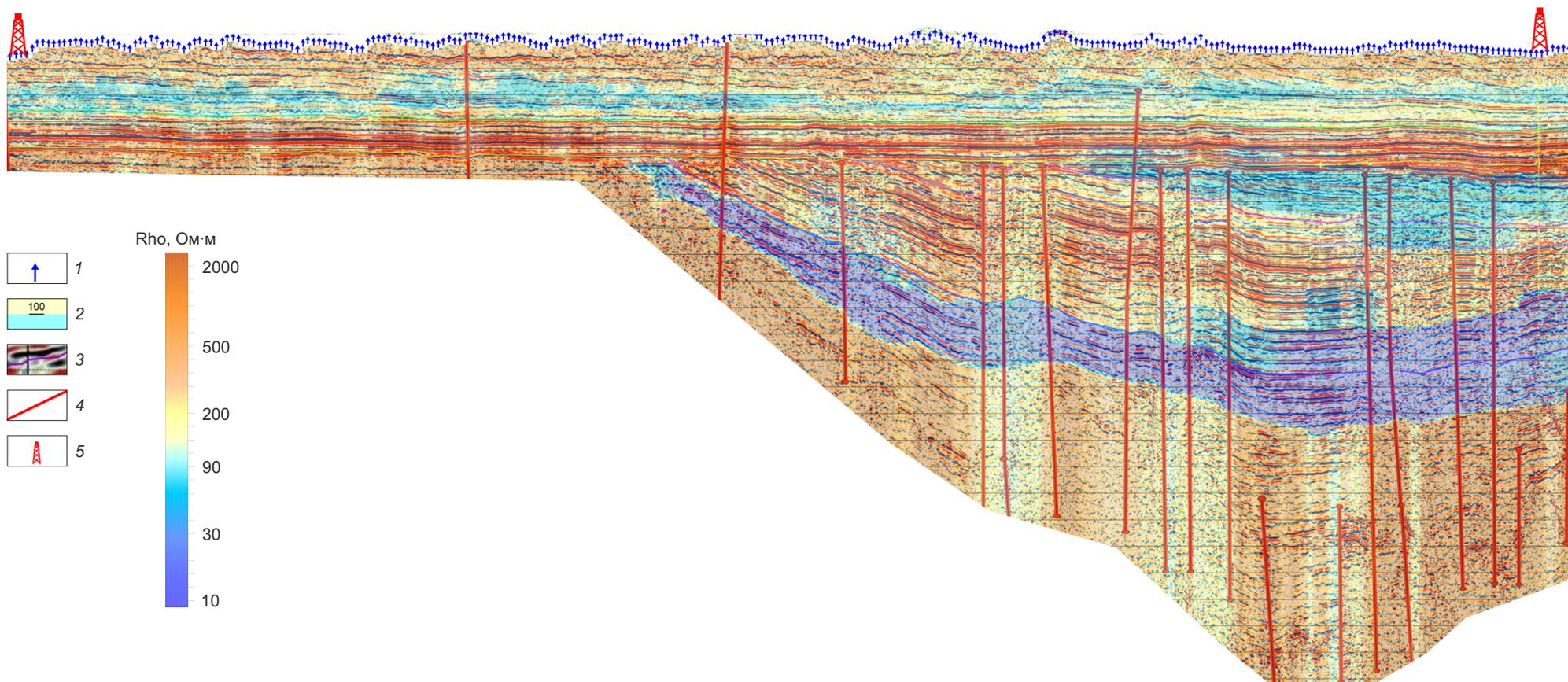


Рис. 1. Сейсмогеоэлектрический разрез, полученный по данным МОВ ОГТ 2D и 2D-ЗСБ в пределах Алдано-Майской впадины.

1 - пункты ЗСБ; 2 - геоэлектрические горизонты и их сопротивления, Ом·м; 3 - временной сейсмический разрез; 4 - тектонические нарушения по данным сейморазведочных работ; 5 - скважина глубокого бурения.

Fig. 1. Seismic-geoelectric section based on the 2D TEM and 2D CDP data on the Aldan-Maiskaya depression.

1 - TEM points; 2 - geoelectric horizons and their resistance, Ohm·m; 3 - time seismic section; 4 - tectonic faults according to seismic survey data; 5 - deep drilling well.

с помощью электроразведки ЗСБ в ходе изучения шарьяжно-надвиговых и других сложнопостроенных структур, наглядно показывают ее эффективность.

По результатам проведения электроразведочных работ ЗСБ в районе сочленения Анабарской антеклизы и внешнего крыла Приверхоянского прогиба Сибирской платформы отчетливо выделяется Сололийское поднятие, осложняющее Оленекский свод (рис. 2). Древние породы архея и протерозоя выходят на дневную поверхность и, по данным ЗСБ, характеризуются высоким сопротивлением.

По резкой смене геоэлектрических характеристик разреза картируется граница между высокоомными породами протерозоя и проводящими мезозой-палеозойскими отложениями.

Фиксируются выходы на поверхность отложений ниже-верхнепротерозойского возраста и магматических раннепротерозойских образований.

Неоднократно предпринимались попытки выбора геофизических методов для прямых поисков месторождений нефти и газа [Bernshtein et al., 1977]. Так, применение сейсморазведки базируется на двух предпосылках: а) картирование отражений от границ

флюидоконтакта; б) увеличение поглощения сейсмических волн залежами УВ. Однако применение данного подхода малоэффективно в регионах со сложным геологическим строением (высокоскоростной, тонкослоистый, неоднородный разрез, небольшие по размерам залежи с нечетким контактом, большие глубины залегания и т.д.). Вместе с тем залежи УВ могут значительно отличаться от вмещающих и водонасыщенных пород по УЭС, что открывает возможности для применения электроразведки. Однако авторам представляется, что применение «монометода» для прямых поисков месторождений нефти и газа вряд ли может показать эффективность, сопоставимую с результатами, которых можно достичь за счет применения комплекса методов. Так, в работах [Mandelbaum et al., 1983] убедительно показано, что выделение объектов АТЗ возможно за счет применения комплекса методов сейсмо-и электроразведки.

Применение метода ЗСБ на поисково-оценочном этапе позволяет решать широкий спектр геологических задач, начиная от изучения структурно-тектонических особенностей разреза, заканчивая прогнозом условий бурения. Поскольку электроразведка обычно

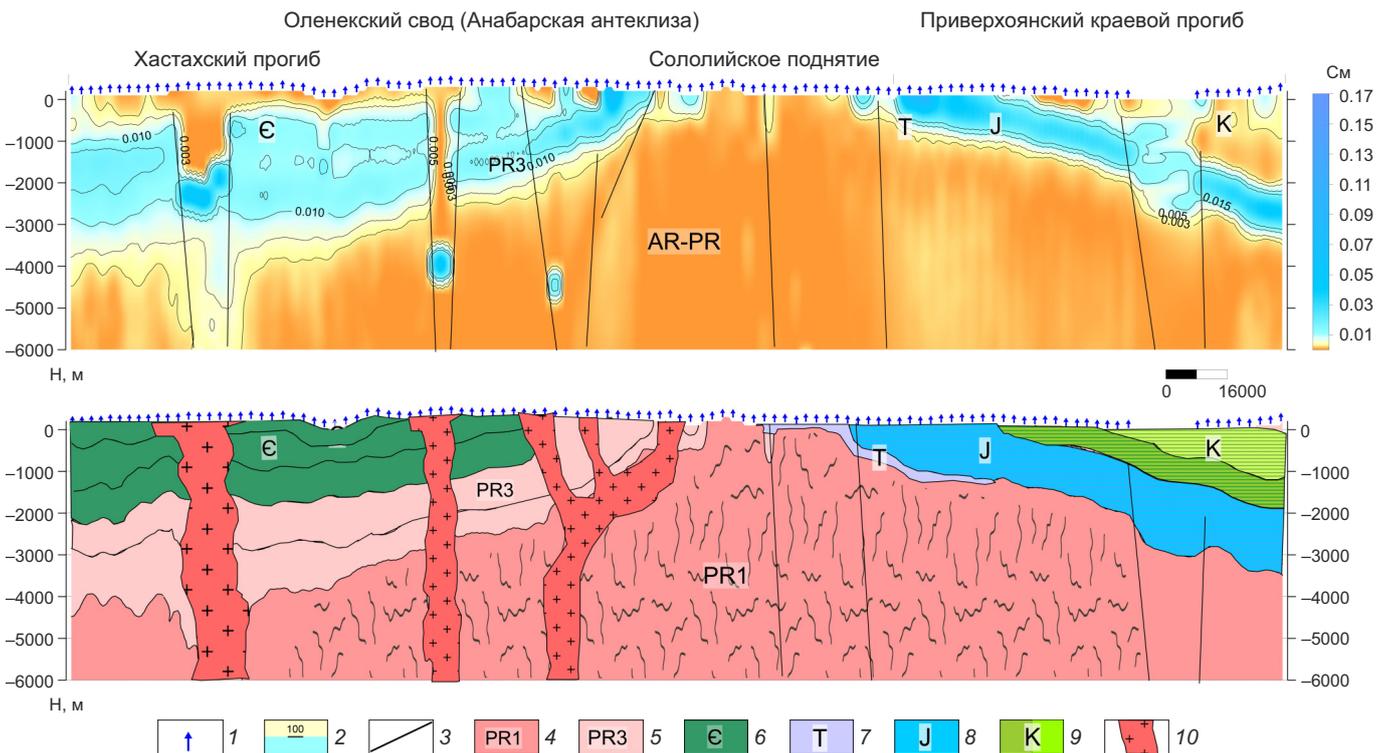


Рис. 2. Результаты интерпретации ЗСБ, зона сочленения Оленекского свода и Приверхоянского краевого прогиба. (а) – разрез дифференциальной проводимости от глубины; (б) – геологический разрез. 1 – пункты ЗСБ; 2 – геоэлектрические горизонты и их сопротивления, Ом·м; 3 – предполагаемые тектонические нарушения по данным ЗСБ; 4 – метаморфизованные породы нижнего протерозоя; 5 – терригенно-карбонатные породы верхнего протерозоя; 6 – преимущественно карбонатные отложения кембрия; 7–9 – терригенные отложения: 7 – триаса; 8 – юры; 9 – мела; 10 – раннепротерозойские интрузии.

Fig. 2. The 2D TEM interpretation results for the junction zone of the Olenek arch and the Priverkhoyansk foredeep. (a) – section of differential conductivity vs depth; (b) – geological section. 1 – TEM points; 2 – geoelectric horizons and their resistance, Ohm·m; 3 – tectonic faults assumed from the TEM data; 4 – lower Proterozoic metamorphosed rocks; 5 – upper Proterozoic terrigenous-carbonate rocks; 6 – predominantly Cambrian carbonate strata; 7–9 – terrigenous strata: 7 – Triassic, 8 – Jurassic, 9 – Cretaceous; 10 – Early Proterozoic intrusions.

применяется в комплексе с сейсморазведкой, то полезно будет рассмотреть особенности данных методов на различных этапах ГРП (табл. 2).

Для наглядной иллюстрации области применения ЗСБ на всех этапах ГРП была составлена дорожная карта постановки сейсмо- и электроразведочных работ (рис. 3). На поисково-оценочном этапе электроразведка ЗСБ по отношению к сейсморазведочным работам может проводиться по двум сценариям: 1) опережающие исследования; 2) сопутствующие исследования.

Первый сценарий подразумевает проведение ЗСБ по существующей сети дорог и профилей прошлых лет без необходимости выполнения рубки. Данный аспект крайне важен, т.к. рубка профилей и получение соответствующих разрешений – длительный процесс и может занять от 6 месяцев до 1 года, что затягивает ход ГРП. Сеть наблюдений ЗСБ проектируют таким образом, чтобы изучить участок работ несколькими траверсами, вкрест пересекающими основные геологические структуры. Если позволяет сеть имеющихся дорог/профилей прошлых лет, то сетку сгущают в областях наибольшего интереса с позиций нефтегазонакопления. Если на участке работ имеются глубокие скважины, то профили ЗСБ проектируют для их пересечения. Длительность полевых работ зависит от

объема исследований и обычно составляет 2–3 месяца. Камеральные работы выполняются в течение 3 месяцев. Таким образом, весь цикл электроразведочных работ составляет порядка полугода, что позволяет оперативно получать ценную геологическую информацию – оконтуривать зоны распространения коллекторов перспективных интервалов разреза. Ранжирование участка работ по степени перспективности позволит спроектировать сеть более дорогостоящей 2D-сейсморазведки в наиболее интересных с точки зрения нефтегазоносности областях и не тратить средства на проведение исследований в заведомо бесперспективных зонах.

Второй сценарий подразумевает выполнение комплекса сейсмо- и электроразведочных 2D-работ по совмещенной сети профилей. Такие работы чаще всего проводятся в один сезон двумя методами параллельно, что позволяет оптимизировать затраты на логистику, чистку профилей и т.д. Комплексирование результатов двух методов позволяет изучить не только структурные особенности территории исследования, выделить динамические аномалии, приуроченные к перспективным горизонтам разреза, проследить тектонические нарушения, но и оконтурить зоны распространения коллекторов в широком диапазоне глубин

Таблица 2. Особенности методов сейсмо- и электроразведки при решении задач на этапах ГРП

Table 2. Features of seismic and electromagnetic prospecting and corresponding stages of geologic exploration

Этап ГРП	Задача	Сейсморазведка ОГТ	Электроразведка ЗСБ
Поисково-оценочный	Прослеживание границ слоев, тектонических нарушений	Максимальная разрешающая способность в случае контрастных акустических границ. Высокоточная структурно-тектоническая модель разреза	Прослеживание геоэлектрических границ – изменения УЭС структурно-вещественных комплексов. Разрешение ниже, чем в сейсмике. Однако можно разделять комплексы пород, не имеющие контрастных акустических границ: например границу рифея и фундамента (гранитоидов)
	Выделение коллекторов	Возможность оценки коллекторских свойств разреза с опорой на скважины. Трудности при изучении карбонатов	Возможно выделение флюидонасыщенного коллектора, контрастно отличающегося по УЭС от вмещающих отложений, без привязки к скважинам. Например, терригенный резервуар или аномальный трещинно-кавернозный коллектор в карбонатах
	Оценка ресурсов УВ	Постановка ресурсов категорий D_n и D_0	
Разведочный	Оценка коллекторских свойств	Возможна оценка $H_{эфф}$ и K_n при наличии опорных скважин с достаточным комплексом ГИС	Возможна независимая оценка на качественном уровне (коллектор/неколлектор). При комплексировании с МОВ ОГТ и материалами бурения – оценка $H_{эфф}$ и K_n с привлечением петрофизики (зависимость Дахнова – Арчи).
	Оценка насыщения коллектора	Выполнимо в благоприятных геологических условиях. В Восточной Сибири – трудновыполнимо	Условное ранжирование по насыщению с опорой на результаты бурения. При комплексировании с МОВ ОГТ и материалами бурения – оценка K_n с привлечением петрофизики (зависимость Дахнова – Арчи)
	Картирование разломов	Высокая точность при наличии разломов со смещением. Невозможность оценки степени проницаемости разломных зон	Возможно картирование разломов при резком изменении УЭС слоев. Возможна оценка степени проницаемости разлома для флюидов, наличия вторичной минерализации (карбонатизация, засоление)
	Изучение верхней части разреза	Трудновыполнимо со стандартной системой наблюдения, ориентированной на поиски УВ	Методом мЗСБ возможно детальное изучение верхней части разреза (ВЧР) до 500 м: поиски водоносных горизонтов, построение скоростной модели, изучение структуры ММП, поиски газогидратов и газовых пузырей, булгунняхов, геоэкологические исследования, мониторинг и др.
	Оценка и подсчет запасов УВ	Оконтуривание запасов категории C_2	

от 100 м до 3–4 км, выделить зоны низких перспектив – неколлекторов. Опираясь на данную геолого-геофизическую информацию, производится выбор точек заложения скважин поисково-оценочного бурения.

Необходимо отметить важность правильности составления проектно-сметной документации (ПСД) на ГРП. В соответствии с правилами проектирования [On Subsoil..., 1992; Rules..., 2016], весь ход работ соответствующего этапа и стадии ГРП должен быть изложен с предоставлением необходимого обоснования, методики работ и ожидаемых результатов. Здесь же должна быть заложена последовательность ГРП: электроразведка (опережающая или сопутствующая), сейсморазведка, бурение поисково-оценочных скважин, подсчет запасов (ПЗ). Правильное планирование ГРП обеспечит оптимальную последовательность изучения участка недр и эффективное использование новой геолого-геофизической информации.

Разведочный этап. В соответствии с [Temporary Regulation..., 2001], целью разведочного этапа является изучение характеристик месторождения для составления технологической схемы разработки (ТСР) либо проекта опытно-промышленной эксплуатации, уточнение промысловых характеристик объектов. В типовой комплекс работ входят детализационные геолого-геофизические работы на площади и в скважинах, а также высокоплотная 3D-сейсморазведка.

За последние 10 лет электроразведка мЗСБ стала неотъемлемой частью комплекса ГРП на разведочном этапе, а в последние годы – и на эксплуатационном (рис. 3). Как правило, мЗСБ выполняется совместно с ЗСБ 3D (одной полевой партией) по совмещенной сети наблюдений в один полевой сезон с 3D-сейсморазведкой, что позволяет оптимизировать затраты в рамках этапа ГРП [Rybalchenko et al., 2020b].

На разведочном этапе для обеспечения оптимального хода геологоразведочных работ перед недропользователем стоит ряд задач, среди которых:

1. Необходимость минимизации объемов дорогостоящих сейсморазведочных 3D-работ и их проектирование в зонах с высокой вероятностью обнаружения залежей нефти и газа.
2. Выбор точек заложения разведочных скважин в условиях высокой неопределенности наличия коллектора и типа его насыщения.
3. Необходимость оценки горно-геологических условий бурения для минимизации аварий в ходе разведочного бурения.

Первая задача может быть решена путем проведения на предыдущем – поисково-оценочном – этапе электроразведочных 2D-работ для минимизации объемов 3D-сейсморазведки и размещения контуров съемок в наиболее перспективных на нефть и газ областях. В свою очередь, комплекс сейсмо- и электроразведочных

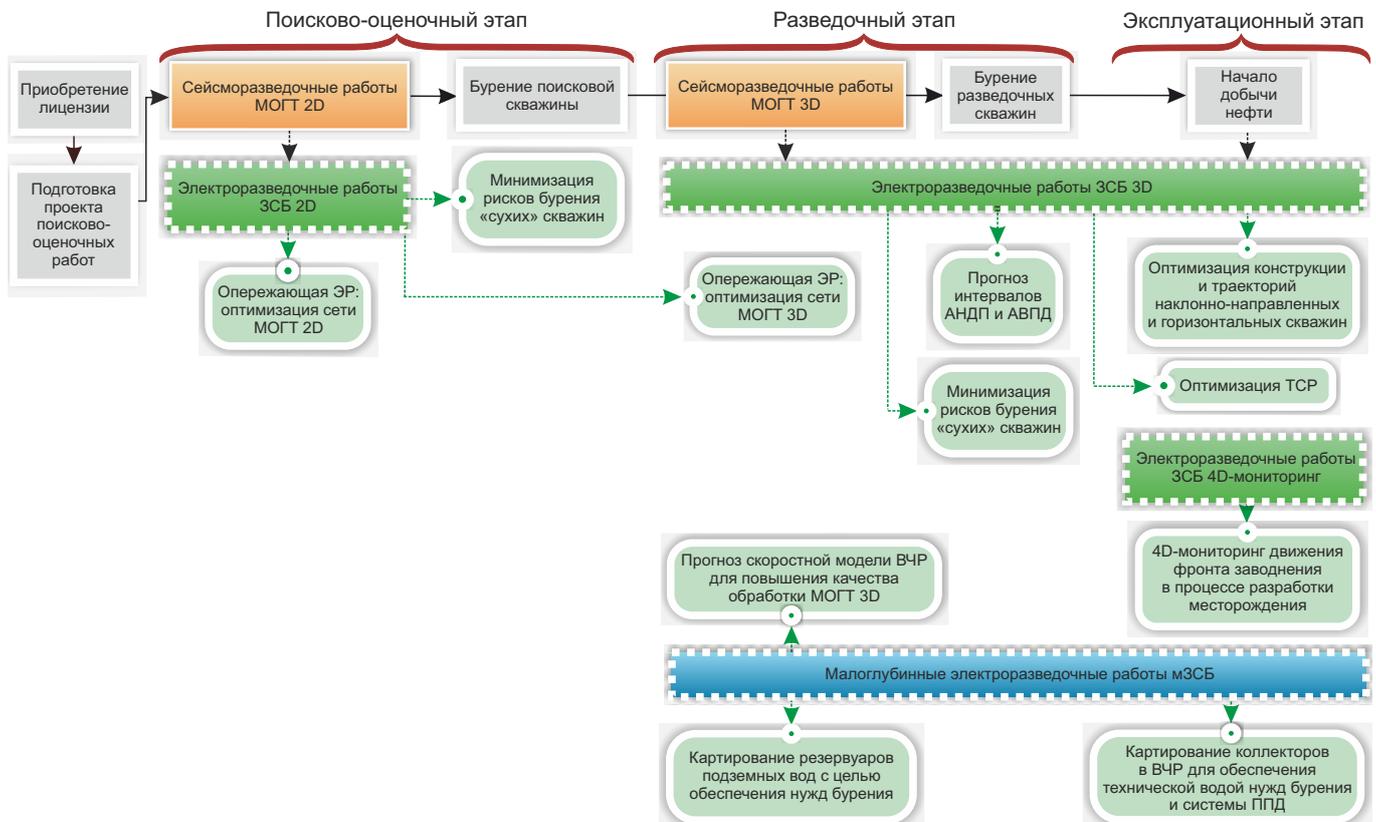


Рис. 3. Дорожная карта постановки сейсмо- и электроразведочных исследований на этапах геологоразведочных работ на нефть и газ [Buddo et al., 2020].

Fig. 3. Workflow of seismic and electromagnetic surveys at the stages of oil and gas exploration [Buddo et al., 2020].

3D-работ по совмещенной сети профилей позволяет оценить коллекторские свойства и тип насыщения резервуаров, минимизировать риски бурения «сухих» скважин, а также прогнозировать интервалы аномально низких (АНПД) и аномально высоких пластовых давлений (АВПД). Поиск водоносных горизонтов для обеспечения нужд бурения может выполняться с помощью метода мЗСБ.

Необходимо отметить, что при корректной постановке соответствующих методов на каждом этапе ГРП электроразведочные 3D-работы являются «нулевым замером» для мониторинговых ЗСБ 4D исследований, позволяющих картировать во времени движение фронта заводнения залежи [Burdakov et al., 2020].

Кроме решения непосредственно нефтегазописковых задач, при разведке месторождений, расположенных в зоне развития многолетнемерзлых пород (ММП), необходимо изучать геокриологические условия территории для последующего проектирования инфраструктуры промысла. Также важной задачей является оценка источников питьевого и технического

водоснабжения месторождения как на разведочном этапе – для нужд бурения, так и для последующего обустройства, обеспечения нужд системы поддержания пластового давления (ППД) и т.д.

Для решения первой задачи – картирования зоны ММП – электроразведка ЗСБ эффективно применяется как в Западной [Misurkeeva et al., 2017], так и Восточной Сибири [Tokareva et al., 2019]. Причиной тому являются особенности физико-геологической модели криолитозоны: многолетнемерзлые, льдистые породы контрастно выделяются по геоэлектрическим свойствам (пониженное УЭС, повышенный коэффициент вызванной поляризации) на фоне талых пород [Kozhevnikov et al., 2014]. Малоглубинная электроразведка мЗСБ успешно применяется в Восточной Сибири для поиска подземных вод, что подтверждено результатами исследований на Среднеботуобинском НГКМ, приуроченном к Непско-Ботуобинской антеклизе [Valeev et al., 2019], Ковыктинском ГКМ Ангаро-Ленской ступени [Misurkeeva et al., 2020; Rybalchenko et al., 2020a] и других месторождениях Иркутской области и Республики Саха

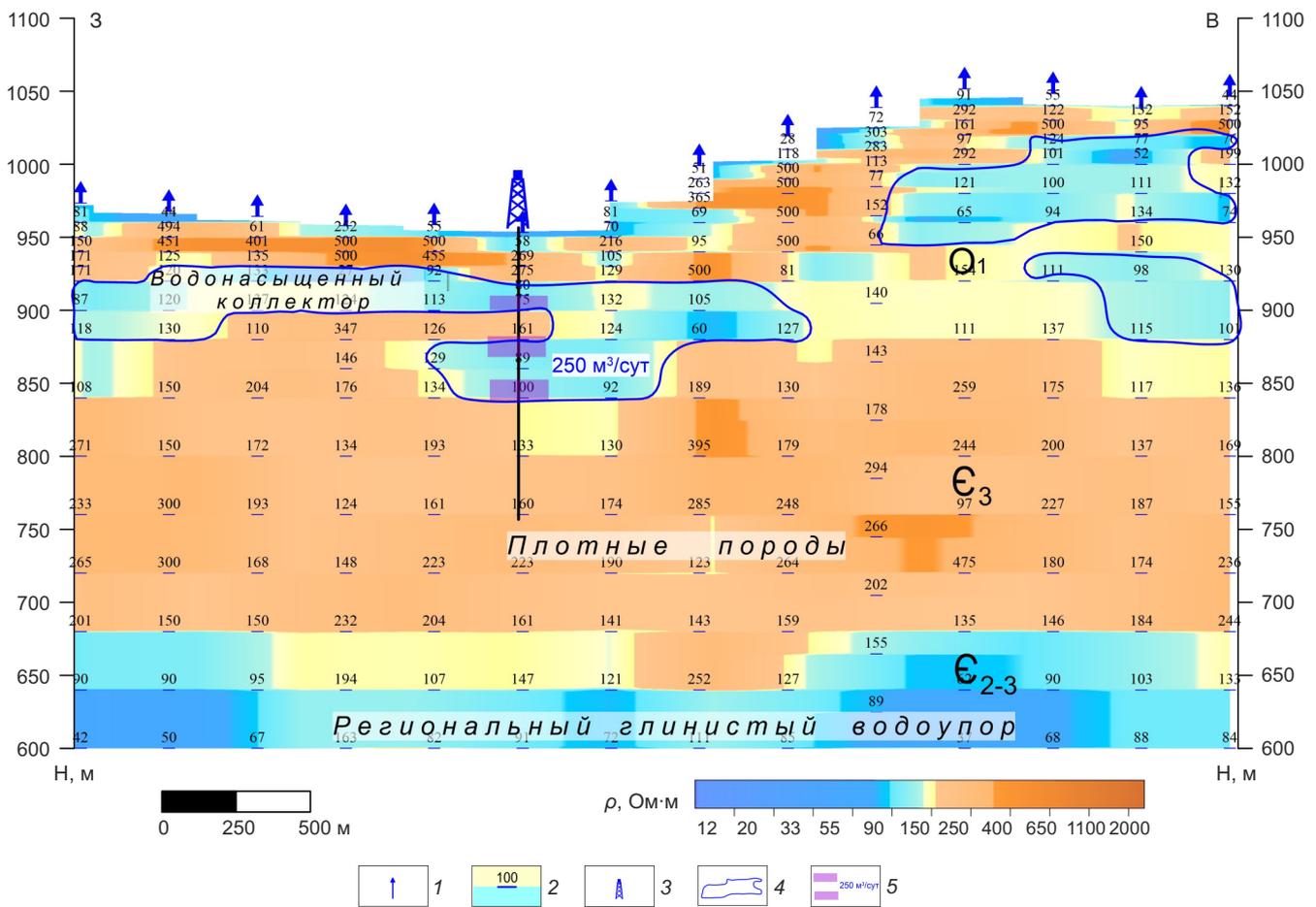


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по данным малоглубинных ЗСБ (Восточная Сибирь). 1 – пункты ЗСБ; 2 – геоэлектрические горизонты и их сопротивления, Ом·м; 3 – гидрогеологическая скважина; 4 – области развития водонасыщенного коллектора по данным мЗСБ; 5 – интервалы и дебит притока воды в скважине.

Fig. 4. Geoelectric section based on the shallow sTEM data (East Siberia). 1 – TEM points; 2 – geoelectric horizons and their resistance, Ohm·m; 3 – hydrogeological well; 4 – water-saturated reservoir according to the TEM data; 5 – intervals and the rates of water inflow in the well.

(Якутия). Предпосылки эффективности мЗСБ при поисках подземных вод базируются на благоприятной физико-геологической модели: водонасыщенные коллекторы контрастно отличаются по УЭС от вмещающих терригенно-карбонатных отложений кембрийского возраста (рис. 4). Зачастую в Восточной Сибири водообильные области приурочены к зонам оттайки, сквозных таликов, хорошо локализуемым по данным мЗСБ.

На разведочном этапе ГРР основной целью проведения комплекса геофизических исследований является получение наиболее полного представления о прогнозных характеристиках перспективных объектов: эффективной толщины $H_{эфф}$, коэффициента пористости K_p и коэффициента водонасыщенности K_v .

Прогнозирование типа флюидонасыщения коллектора K_v возможно за счет интегрирования данных сейсмо- и электроразведки. Интегрирование выполняется путем расчета коэффициента водонасыщенности из значений продольной проводимости по данным нестационарных электромагнитных зондирований и емкостных характеристик ($H_{эфф}$ и K_p) по данным сейсморазведки. Пересчет выполняется с использованием эмпирической петрофизической зависимости Дахнова – Арчи (с учетом коэффициентов, определенных по данным лабораторных исследований керна) [Pospreev et al., 2018]. При этом может рассматриваться не слой геоэлектрической модели мощностью в сотни метров, а непосредственно горизонт-коллектор, продольную проводимость которого определяют в ходе инверсии кривых ЗСБ [Buddo, Pospreev, 2019]. Применение

электроразведки ЗСБ 3D, при наличии информации о емкостных параметрах коллектора по 3D-сейсморазведке, позволяет оценивать коэффициент водонасыщенности K_v (2). Данная информация дополняет геологическую модель месторождения, используемую для обоснованной оценки запасов и в последующем – для ввода месторождения в эксплуатацию.

$$K_v \approx (H_{эфф} / (S \cdot P_n \cdot \rho_{пф}))^{\frac{1}{n}}, \tag{2}$$

где K_v – коэффициент водонасыщенности, S – продольная проводимость коллектора по ЗСБ, P_n – параметр пористости, $\rho_{пф}$ – УЭС пластовой воды, n – константа, характеризующая определенный класс продуктивного коллектора.

Важно помнить, что методы сейсмо- и электроразведки, с помощью которых изучают различные физические свойства исследуемой среды, не следует противопоставлять друг другу, а надлежит применять совместно – в комплексе. Используя сильные стороны каждого метода (табл. 2), возможно получать наиболее точную и информативную геологическую модель разреза месторождений нефти и газа (рис. 5).

Эксплуатационный этап. На этапе ввода месторождения в эксплуатацию актуальными задачами являются:

1. Выбор оптимальной сетки кустового разбуривания месторождения на этапе создания ТСР.
2. Необходимость оценки горно-геологических условий бурения для минимизации аварий в ходе эксплуатационного бурения.

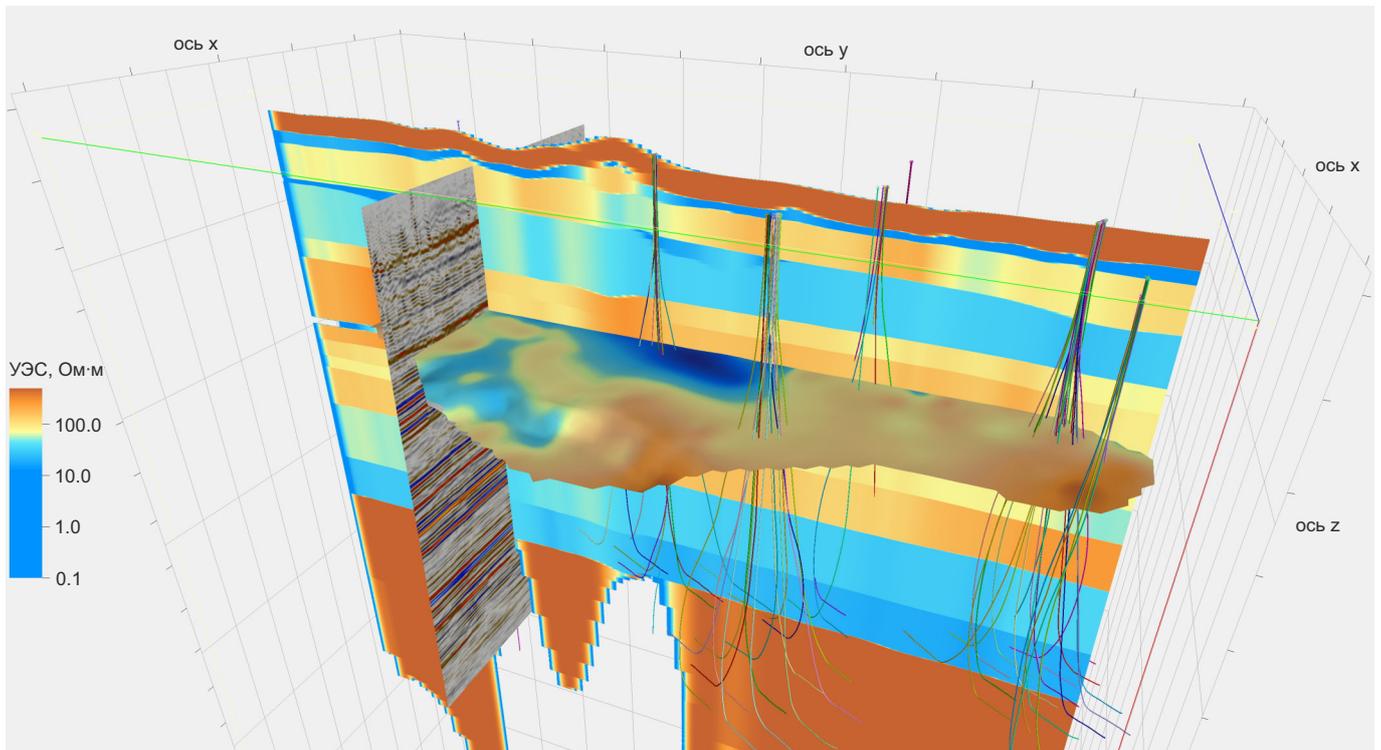


Рис. 5. Пример сейсмогеоэлектрической 3D-модели (Восточная Сибирь).
 Fig. 5. A 3D seismic-geoelectric model (East Siberia).

3. Необходимость обеспечения технической водой для нужд бурения и системы ППД.

4. Мониторинг движения фронта заводнения в процессе разработки месторождения.

Для решения задач оптимизации ТСП и прогноза интервалов вероятных АНПД и АВПД в комплексе с МОВ ОГТ 3D может применяться высокоплотная электро-разведка ЗСБ 3D, что подтверждено результатами исследований в Восточной Сибири [Ilyin et al., 2016, 2018]. Все большее распространение приобретают ЗСБ 4D мониторинговые исследования, позволяющие картировать во времени движение фронта заводнения залежи [Burdakov et al., 2020]. Задача поисков подземных вод для обеспечения системы ППД может быть решена путем применения малоглубинных исследований мЗСБ [Valeev et al., 2019].

Необходимо отметить, что наиболее оптимальной является последовательная постановка электроразведочных работ ЗСБ, начиная с поисково-оценочного и заканчивая эксплуатационным этапом. В таком случае при вводе месторождения в эксплуатацию можно будет использовать геолого-геофизическую модель, построенную по результатам ГРП на предшествующих этапах, что позволит составить ТСП и выбрать оптимальную стратегию разработки.

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СООТВЕТСТВУЮЩИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Важно помнить, что каждому этапу ГРП соответствуют определенные геологические задачи. Например, для регионального этапа характерна низкая изученность района работ геофизическими методами и бурением. С помощью методов электроразведки решаются задачи построения региональной геоэлектрической модели и ранжирования территории по степени нефтегазоперспективности.

На поисково-оценочном этапе изучения лицензионных участков (участков недр) обычно имеется редкая нерегулярная сеть МОГТ 2D и ЗСБ 2D, 1–2 поисково-оценочных или параметрических скважин со стандартным комплексом ГИС. При наличии такого набора геолого-геофизической информации возможно по результатам комплексирования материалов сейсмо- и электроразведки картировать области распространения коллектора, ранжировать территорию по степени перспектив нефтегазоносности, рекомендовать точки заложения поисково-оценочных скважин.

Разведочный этап характеризуется наиболее богатым набором геолого-геофизической информации: имеются либо планируются высокоплотные съемки МОВ ОГТ 3D, ЗСБ 3D; пробурено достаточное для построения геологической модели число поисково-оценочных и разведочных скважин с расширенным комплексом ГИС, испытаниями, отбором керна, микроимиджеровыми и геомеханическими, петрофизическими исследованиями. В таких условиях, после выполнения комплексирования имеющихся геолого-геофизических материалов,

возможна численная оценка емкостных свойств, а также типа насыщения горизонтов-коллекторов. По результатам анализа определенных критериев [Ilyin et al., 2016] выполняется прогноз горно-геологических условий бурения: картирование интервалов возможных поглощений и АВПД. На данном этапе по материалам мЗСБ строят скоростную модель ВЧР, которая может применяться для повышения качества обработки материалов сейсморазведки.

На эксплуатационном этапе к набору информации, полученному на разведочном этапе, добавляются геомеханическая и гидродинамическая модели, фонд пробуренных эксплуатационных скважин. Опираясь на имеющуюся информацию, возможно оптимизировать ТСП, положение кустов скважин. Постановка мониторинговых исследований ЗСБ 4D по закрепленной высокоплотной сети с интервалом измерений в 6–9 месяцев позволяет контролировать движения фронта заводнения нефтяной залежи.

Нарушение стадийности ГРП может привести к некорректной постановке задач. Например, оценка типа насыщения на региональном и поисково-оценочном этапах является некорректной, т.к. не обеспечивается необходимый для комплексирования набор геолого-геофизической информации.

7. ОЦЕНКА РЕСУРСОВ И ПОДСЧЕТ ЗАПАСОВ УГЛЕВОДОРОДОВ С УЧЕТОМ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ЗСБ

В соответствии с [Classification..., 2016], в процессе изучения месторождений нефти и газа осуществляется рациональное комплексирование методов и технических средств разведки. По данным сейсморазведки и бурения на стадии разведки выполняется предварительная оценка запасов залежей. Вместе с тем в работе [Pospeev, 2016] показано, что оценка ресурсов углеводородов (категория С3, ныне упразднена) может проводиться с привлечением материалов электроразведочных работ ЗСБ.

Применение электроразведки ЗСБ позволяет оконтуривать зоны распространения коллекторов, что дает наиболее важную и достоверную геологическую информацию на региональном и поисково-оценочном этапах геологоразведочных работ. На региональном этапе возможна постановка ресурсов категорий D_1 и D_2 , а на поисково-оценочном – локализованных и подготовленных ресурсов категорий D_n и D_0 соответственно.

По [Classification..., 2016] к категории C_2 (оцененные) относятся запасы залежей или их частей, изученных сейсморазведкой или иными высокоточными методами, прошедшими апробацию в установленном порядке, наличие которых обосновано данными геологических и геофизических исследований и испытанием отдельных скважин в процессе бурения.

В соответствии с [Pospeev et al., 2018; Buddo, Pospeev, 2019; Rybalchenko et al., 2020b], электромагнитные зондирования ЗСБ характеризуются высокой чувствительностью к изменению емкостных свойств и насыщения

коллектора. Отсюда на разведочном этапе ГРП на основании материалов электроразведки может быть сделан вывод о непрерывности свойств пласта-коллектора, что позволяет выделять запасы категории C_2 на новых и разведываемых залежах. Для того чтобы обеспечить максимальную точность оценок коллекторских свойств и насыщения коллектора, должно проводиться комплексирование методов электро- и сейсморазведки с результатами бурения (литолого-стратиграфическая разбивка разреза, результаты геофизических исследований в скважинах, а также испытаний, анализ петрофизических свойств пород-коллекторов и др.). В некоторых случаях возможно определение литолого-фациальных характеристик продуктивных пластов неразбуренных тектонических блоков, примыкающих к блокам с установленной продуктивностью, что также позволит оконтурить запасы категории C_2 .

8. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИВЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ В КОМПЛЕКС ГРП

В соответствии с [Classification..., 2016], в процессе изучения месторождений нефти и газа проводится поэтапная геолого-экономическая оценка результатов работ. Экономической оценке в недропользовании посвящено множество работ как зарубежных, так и отечественных авторских коллективов [Rouz, 2011; Dymochkina et al., 2018; и др.]. В настоящее время наиболее часто используется показатель ценности информации – Volume of information (VOI), зависящий от параметра ожидаемого денежного результата Expected monetary value (EMV) и шанса (либо вероятности) геологического успеха [Bush, Johnston, 2003].

Как правило, при оценке шанса (либо вероятности) геологического успеха используют параметры вероятности наличия нефтематеринской породы, путей миграции, коллектора, насыщения и сохранности залежи. Чем выше вероятность каждого из параметров, тем выше шанс геологического успеха. Путем выполнения геологоразведочных работ (сейсморазведка, бурение, ГИС и т.д.) стараются снять неопределенности с указанных критериев. Включение в комплекс методов электроразведочных работ ЗСБ позволяет снизить неопределенности ключевых параметров: существования коллектора, его насыщения и сохранности залежи.

При использовании рассмотренных общепринятых экономических показателей возможны численная оценка вклада электроразведки ЗСБ в оптимизацию стоимости геологоразведочных работ и повышение показателей геолого-экономической оценки проекта.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бессистемное проведение дорогостоящих геофизических исследований, некорректная постановка задач снижают общую эффективность геологоразведочных работ. Напротив, заблаговременное планирование всего процесса ГРП позволяет переходить к каждому последующему этапу, опираясь на надежную информационную базу – результаты, полученные на предыдущем

этапе. Согласно принципу усложнения геологических задач, характерному для последовательной смены стадий ГРП, должна применяться и соответствующая модификация электромагнитных зондирований 2D/3D/4D.

Корректная постановка комплекса сейсмо- и электроразведочных работ на каждом этапе ГРП позволит снизить затраты за счет оптимизации сети сейсморазведочных 3D-работ, минимизировать риски бурения «сухих» разведочных скважин, риски аварий в ходе разведочного и эксплуатационного бурения при вскрытии объектов с АНПД и АВПД, оптимизировать ТСР месторождения, осуществлять эффективный мониторинг разработки.

Представляется, что с помощью электроразведки ЗСБ открывается возможность на поисково-оценочном этапе выделять ресурсы категорий D_n и D_o на разведочном – запасы категории C_2 на новых и разведываемых залежах, а расчет экономических показателей привлечения электроразведки в комплекс ГРП позволяет перейти к количественным оценкам эффективности комплекса методов ГРП.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bernshtein G.L., Mandelbaum M.M., Rapoport M.B., Shornikova M.V., 1977. Methodological Features of Direct Prospecting for Oil and Gas Fields on the Southern Slope of the Nepa Arch. All-Union Scientific Research Institute of Nuclear Geophysics and Geochemistry, Moscow (in Russian) [Бернштейн Г.Л., Мандельбаум М.М., Рапопорт М.Б., Шорникова М.В. Методические особенности прямых поисков нефтегазовых месторождений на южном склоне Непского свода. М.: ВНИИЯГГ ОНТИ, 1977].

Buddo I.V., Pospeev A.V., 2019. Precise Inversion of Transient Electromagnetic Sounding Method Data for Oil and Gas Exploration in the Southern Part of the Siberian Craton. ISU Publishing House, Irkutsk, 149 p. (in Russian) [Буддо И.В., Поспеев А.В. Прецизионная инверсия данных ЗСБ при поисках нефти и газа на юге Сибирской платформы. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. 149 с.].

Buddo I., Shelokhov I., Agafonov E., Agafonov Y., Smirnov A., Grigoriev G. Some Aspects of Electromagnetic and Seismic Surveys Joint Application for Oil and Gas Exploration. In: GeoBaikal 2020. Proceedings of 6th International Scientific and Practical Conference (October 5–9, 2020, Irkutsk). EAGE, Irkutsk, p. 1–6 (in Russian) [Буддо И.В., Шелохов И.А., Агафонов Е.А., Агафонов Ю.А., Смирнов А.С. Особенности постановки комплекса электро- и сейсморазведочных работ для решения нефтегазопроисковых задач // ГеоБайкал 2020: Материалы 6-й Международной научно-практической конференции (5–9 октября 2020 г.). Иркутск: EAGE, 2020. С. 1–6]. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202052048>.

Burdakov D.A., Sibilev V.N., Tokareva O.V., Kolesov V.A., Agafonov Yu.A., 2020. Monitoring of the Water Injection Front of the Lower Cambrian Carbonate Reservoirs with the Use of the 4D Electrical Prospecting Method. Oil Industry 9, 30–34 (in Russian) [Бурдаков Д.А., Сибилев В.Н., Токарева О.В., Колесов В.А., Агафонов Ю.А. Мониторинг

фронта заводнения карбонатных коллекторов нижнего кембрия методом 4D электроразведки // Нефтяное хозяйство. 2020. № 9. С. 30–34]. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-9-30-34>.

Bush J., Johnston D., 2003. International Oil Company Financial Management. Olymp-Business, Moscow, 414 p. (in Russian) [Буш Дж., Джонстон Д. Управление финансами в международной нефтяной компании. М.: Олимп-Бизнес, 2003. 414 с.].

Chave A.D., Constable S.C., Edwards R.N., 1992. Electrical Exploration Methods for the Seafloor. In: M.N. Nabighian (Ed.), *Electromagnetics Methods in Applied Geophysics*. P. 931–966. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802686.ch12>.

Classification of Reserves and Resources of Oil and Combustible Gases, 2016. Regulatory and Methodological Documentation. Eurasian Union of Subsoil Use Experts, Moscow, 320 p. (in Russian) [Классификация запасов и ресурсов нефти и горючих газов: Нормативно-методическая документация. М.: ЕСОЭН, 2016. 320 с.].

Constable S.C., Srnka L.J., 2007. An Introduction to Marine Controlled-Source Electromagnetic Methods for Hydrocarbon Exploration. *Geophysics* 72 (2), 1MA-Z35. <https://doi.org/10.1190/1.2432483>.

Dakhnov V.N., 1985. *Geophysical Methods for Determining Reservoir Properties and Oil and Gas Contents of Rocks*. Nedra, Moscow, 310 p. (in Russian) [Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. М.: Недра, 1985. 310 с.].

Dymochkina M.G., Kiselev P.Yu., Pislegin M.N., Kuzmin T.G., Mullagaliev A.T., 2018. Geological and Economic Evaluation (GEE): From Present to Future. PRONEFT. Professionally about Oil 3 (9), 18–23 (in Russian) [Дымочкина М.Г., Киселев П.Ю., Пислегин М.Н., Кузьмин Т.Г., Муллагалиев А.Т. Геолого-экономическая оценка проектов: настоящее и будущее // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2018. № 3 (9). С. 18–23]. <https://doi.org/10.24887/2587-7399-2018-3-18-23>.

Gabrielyants G.A., 2000. *Geology, Prospecting and Exploration of Oil and Gas Fields*. Nedra, Moscow, 587 p. (in Russian) [Габриэлянц Г.А. Геология, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений. М.: Недра, 2000. 587 с.].

Ilyin A.I., Kolesnikov D.V., Buddo I.V., Vakhromeyev A.G., Shelohov I.A., Agafonov Y.A., Sultanov R.B., 2018. Fractured Fluid-Bearing Reservoirs in Magmatic Rocks Prediction According to Transient Electromagnetic Soundings Data. In: *GeoBaikal 2018. Proceedings of 5th International Scientific and Practical Conference (August 11–17, 2018, Irkutsk)*. EAGE, p. 1–6 (in Russian) [Ильин А.И., Колесников Д.В., Буддо И.В., Вахромеев А.Г., Шелохов И.А., Агафонов Ю.А., Султанов Р.Б. Прогнозирование трещиноватых флюидонасыщенных резервуаров в траппах по данным электроразведки ЗСБ // ГеоБайкал 2018: Материалы 5-й Международной научно-практической конференции (11–17 августа 2018 г.). EAGE, 2018. С. 1–6]. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802045>.

Ilyin A.I., Vakhromeev A.G., Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., Pospeev A.V., Smirnov A.S., Gorlov I.V., 2016. A New Approach to Predicting Abnormally High Reservoir Pressure in the Cambrian Carbonate Rapa-Bearing Reservoirs of the Kovykta Gas Condensate Field. In: *GeoBaikal 2016. Expanding the Horizons. Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference (August 22–26, 2016)*. EAGE, Irkutsk, 1–5 (in Russian) [Ильин А.И., Вахромеев А.Г., Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Поспеев А.В., Смирнов А.С., Горлов И.В. Новый подход к прогнозу АВПД в карбонатных рапоносных коллекторах кембрия на Ковыктинском ГКМ // ГеоБайкал 2016: Расширяя горизонты: Материалы 4-ой Международной научно-практической конференции (22–26 августа 2016 г.). Иркутск: EAGE, 2016. С. 1–5].

Kamaletdinov M.A., Kazantsev Yu.V., Kazantseva T.T., 1983. *Scientific Fundamentals of Prospecting for Oil and Gas Structures*. Publishing House of the Bashkir Branch of the USSR Earth Sciences, 42 p. (in Russian) [Камалетдинов М.А., Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т. Научные основы поисков нефтегазоносных структур. Уфа: Изд-во БФ АН СССР, 1983. 42 с.].

Kaufman A.A., Morozova G.M., 1970. *Theoretical Fundamentals of the Near-Field Sounding Method*. Nauka, Novosibirsk, 124 p. (in Russian) [Кауфман А.А., Морозова Г.М. Теоретические основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне. Новосибирск: Наука, 1970. 124 с.].

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., Zakharkin M.A., Korsakov M.A., 2014. Search for Taliks by the TEM Method in Conditions of Intense Induction-Induced Polarization. *Russian Geology and Geophysics* 55 (12), 1815–1827 (in Russian) [Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Захаркин М.А., Корсаков М.А. Поиск таликов методом ЗСБ в условиях интенсивного проявления индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 12. С. 1815–1827].

Mandelbaum M.M., Rabinovich B.I., Surkov B.S. (Eds), 1983. *Geophysical Methods for Discovery of Oil and Gas Deposits on the Siberian Platform*. Nedra, Moscow, 128 p. (in Russian) [Геофизические методы обнаружения нефтегазовых залежей на Сибирской платформе / Ред. М.М. Мандельбаум, Б.И. Рабинович, В.С. Сурков. М.: Недра, 1983. 128 с.].

Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., 2015. The Results of Electrical Exploration by the TEM Method for Mapping of the Riphean Deposits in the Republic of Sakha (Yakutia). In: *Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials of Siberia. Proceedings of the Second Scientific and Practical Conference (April 21–24, 2015)*. Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials, Novosibirsk, p. 80–83 (in Russian) [Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. Результаты электроразведочных работ методом ЗСБ при картировании рифейских отложений на территории Республики Саха (Якутия) // Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири: Материалы второй научно-практической конференции (21–24 апреля 2015 г.). Новосибирск: СНИИГГиМС, 2015. С. 80–83].

Misurkeeva N.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., Smirnov A.S., Zharikov M.G., Kulichenko A.S., 2017. The Results of Electromagnetic Studies by 3D TEM and sTEM Methods in the Arctic Zone of West Siberia. In: Geomodel 2017. Proceedings of the 19th Scientific and Practical Conference on Geological Exploration and Development of Oil and Gas Fields (September 11–14, 2017). EAGE, 1–6 (in Russian) [Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Смирнов А.С., Жариков М.Г., Кулинченко А.С. Результаты применения электромагнитных исследований 3D ЗСБ и мЗСБ в условиях Арктической зоны Западной Сибири // Геомодель 2017: Материалы 19-й научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (11–14 сентября 2017 г.). EAGE, 2017. С. 1–6]. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201702225>.

Misurkeeva N.V., Buddo I.V., Komarov A.G., Smirnov A.S., 2020. Shallow TEM for Underground Water Exploration of the Kovykta Gas-Condensate Field on the Development Stage. In: GeoBaikal 2020. Proceedings of 6th International Scientific and Practical Conference (October 5–9, 2020). EAGE, Irkutsk, p. 1–6 (in Russian) [Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Комаров А.Г., Смирнов А.С. Малоглубинная электроразведка мЗСБ для поиска подземных вод при обустройстве Ковыктинского ГКМ // ГеоБайкал 2020: Материалы 6-й Международной научно-практической конференции (5–9 октября 2020 г.). Иркутск: EAGE, 2020. С. 1–6]. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202052052>.

Mukhin V.M., 2008. Stages and Fundamentals of the Methods of Prospecting and Exploration of Oil and Gas Fields. Textbook. SU Publishing House, Saratov, 32 p. (in Russian) [Мухин В.М. Стадийность и основы методики поисков и разведки месторождений нефти и газа: Учебное пособие. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2008. 32 с.].

Nikonov N.I., 2006. Rational Complex of Oil and Gas Prospecting and Exploration. Lectures Course. Ukhta State Technical University, Ukhta, 312 p. (in Russian) [Никонов Н.И. Рациональный комплекс поисково-разведочных работ на нефть и газ: Курс лекций. Ухта: УГТУ, 2006. 312 с.].

On Subsoil. Law of the Russian Federation of February 21, 1992, № 2395-1 Amended on November 8, 2020 (in Russian) [О недрах: Закон Российской Федерации от 21.02.1992 № 2395-1 с изм. от 08.11.2020]. Available from: <https://base.garant.ru/10104313/>. (Last Accessed February 20, 2021).

Pospeev A.V., 2016. Feasibility of Hydrocarbon Resource Appraisal of the Southern Siberian Platform by Electromagnetic Data. Geography and Natural Resources 6, 139–143 (in Russian) [Поспеев А.В. Возможность оценки ресурсов углеводородов юга Сибирской платформы по электромагнитным данным // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 139–143]. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(139-143\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(139-143)).

Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A. et al., 2018. Modern Practical Electrical Prospecting. GEO, Novosibirsk, 231 p. (in Russian) [Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. и др. Современная практическая электроразведка. Новосибирск: GEO, 2018. 231 с.].

Rouz P.R., 2011. Risk Analysis and Management of Oil and Gas Exploration Projects. RCD Publishing Center, Izhevsk Institute of Computer Research, Moscow – Izhevsk, 304 p. (in Russian) [Роуз П.Р. Анализ рисков и управление нефтегазопроисковыми проектами. М.–Ижевск: НИЦ «РДХ», Ижевский институт компьютерных исследований, 2011. 304 с.].

Rules for Preparation of Project Documentation for Geological Studies of Subsoil and Exploration of Mineral Deposits by Types of Minerals. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation of June 14, 2016, № 352 (in Russian) [Правила подготовки проектной документации на проведение геологического изучения недр и разведки месторождений полезных ископаемых по видам полезных ископаемых: Приказ МПР РФ от 14.06.2016 № 352]. Available from: <https://rosnedra.gov.ru/data/Files/File/4182.pdf>. (Last Accessed February 20, 2021).

Rybalchenko V.V., Trusov A.I., Buddo I.V., Abramovich A.V., Smirnov A.S., Misurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Otsimik A.A. et al., 2020a. Complex of Accompanying Surveys at the Stages of Exploration and Development of Oil and Gas Fields: From Permafrost Mapping to the Search for Groundwater for Drilling and Field Operation. Gas Industry 11/808, 20–28 (in Russian) [Рыбальченко В.В., Трусов А.И., Буддо И.В., Абрамович А.В., Смирнов А.С., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Оцимик А.А. и др. Комплекс вспомогательных исследований на этапах разведки и разработки месторождений нефти и газа: от картирования многолетнемерзлых пород до поисков подземных вод для обеспечения бурения и эксплуатации // Газовая промышленность. 2020. № 11/808. С. 20–28].

Rybalchenko V.V., Trusov A.I., Buddo I.V., Abramovich A.V., Smirnov A.S., Misurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Otsimik A.A. et al., 2020b. Increasing the Reliability of Solutions for Oil and Gas Prospecting Problems Based on the Integration of Seismic and Electrical Prospecting at the Sites of PJSC Gazprom (West and East Siberia). Gas Industry 10/807, 20–29 (in Russian) [Рыбальченко В.В., Трусов А.И., Буддо И.В., Абрамович А.В., Смирнов А.С., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Оцимик А.А. и др. Повышение достоверности решения нефтегазопроисковых задач по результатам комплексирования сейсмо- и электроразведки на участках ПАО «Газпром» (Западная и Восточная Сибирь) // Газовая промышленность. 2020. № 10/807. С. 20–29].

Seminsky I.K., Ilyin A.I., Guseinov R.G., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., 2014. The Choice of an Optimal Step between the TEM Receivers by 3D Modeling for the Geological Setting of East Siberia. Bulletin of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits 4 (47), 56–63 (in Russian) [Семинский И.К., Ильин А.И., Гусейнов Р.Г., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. Выбор оптимального шага между приемниками ЗСБ посредством 3D моделирования для геологических условий Восточной Сибири // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 4 (47). С. 56–63].

Seminsky I.K., Pospeev A.V., Guseinov R.G., 2019. Optimization of the Near-Field Transient Electromagnetic Sounding Method by Means of Mathematical Modeling. ISU Publishing House, Irkutsk, 129 p. (in Russian) [Семинский И.К., Поспеев А.В., Гусейнов Р.Г. Оптимизация метода зондирования становлением поля в ближней зоне средствами математического моделирования. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. 129 с.].

Sharlov M.V., 2017. Integrated System for Processing and Inversion of Non-Stationary Electromagnetic Sounding Data. *Equipment and Systems of Geophysical Prospecting* 60 (2), 24–35 (in Russian) [Шарлов М.В. Интегрированная система обработки и инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т. 60. № 2. С. 24–35].

Stefanesco S., Schlumberge C.M., 1930. Sur la Distribution Electrique Potentielle Autour d'une Pile de Terre Penetrant dans un Terrain Couches Horizontales Homogenes et Isotrope. *Journal de Physique et Le Radium* 1 (4), 132–140. <https://doi.org/10.1051/jphysrad:0193000104013200>.

Tabarovskiy L.A., Epov M.I., Sosunov O.G., 1985. Estimation of the Resolution Capacity of Electromagnetic Methods and Suppression of Interference in Multiple Observation Systems (Preprint 7). Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Novosibirsk, 47 p. (in Russian) [Табаровский Л.А., Эпов М.И., Сосунов О.Г. Оценка разрешающей способности электромагнитных методов и подавление помех в системах многократного наблюдения (препринт, № 7). Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1985. 47 с.].

Temporary Classification of Wells Drilled for Exploration and Development of Oil and Gas Fields (Deposits). Appendix 2 to the Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation of February 7, 2001, № 126] (in Russian) [Временная классификация скважин, бурящихся при геологоразведочных работах и разработке нефтяных и газовых месторождений (залежей): Приложение 2 к Приказу МПР РФ от 07.02.2001 № 126]. Available from: <https://sudact.ru/law/prikaz-mpr-rf-ot-07022001-n-126/prilozhenie-2/>. (Last Accessed February 20, 2021).

Temporary Regulation on the Phases and Stages of Geological Exploration for Oil and Gas. Appendix 1 to the Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation of February 7, 2001, № 126 (in Russian) [Временное положение об этапах и стадиях геологоразведочных работ на нефть и газ: Приложение 1 к Приказу МПР РФ от 07.02.2001 № 126]. Available from: <https://sudact.ru/law/prikaz-mpr-rf-ot-07022001-n-126/prilozhenie-1/>. (Last Accessed February 20, 2021).

Tokareva O.V., Otsimik A.A., Buddo I.V., Shelokhov I.A., Alexandrova A.M., Akulova I.V., Sharlov M.V., Elimova V.V., Sabanchin I.V., 2019. Shallow Electromagnetic Soundings sTEM for Water-Bearing Reservoirs Mapping under the Permafrost Zone within Yakutia Region. In: *Geomodel 2019. Proceedings of 21st Scientific and Practical Conference on Geological Exploration and Development of Oil and Gas Fields (September 9–13, 2019)*. EAGE, p. 1–6 (in Russian) [Токарева О.В., Оцимик А.А., Буддо И.В., Шелохов И.А., Александрова А.М., Акулова И.В., Шарлов М.В., Елимова В.В., Сабанчин И.В. Малоуглубленные электромагнитные зондирования мЗСБ для картирования водонасыщенных горизонтов-коллекторов под зоной распространения ММП на территории Якутии // Геомодель 2019: Материалы 21-й научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (9–13 сентября 2019 г.). EAGE, 2019. С. 1–6]. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201950153>.

Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu., 1989. Integration of Geophysical Methods and Geophysical Models. Textbook. Irkutsk Polytechnical Institute, Irkutsk, 88 p. (in Russian) [Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Комплексирование геофизических методов и физико-геологические модели: Учебное пособие. Иркутск: ИПИ, 1989. 88 с.].

Valeev R.R., Kolesnikov D.V., Buddo I.V., Ilyin A.I., Aksenovskaya A.A., Cherkasov N.A., Agafonov Yu.A., Grinchenko V.A., 2019. Approach to Solving the Problem of Water Deficit for Reservoir Pressure Maintenance Systems in Oil Fields of East Siberia (Case of the Srednebotuobinskoe Oil-Gas-Condensate Field). *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields* 1, 55–67 (in Russian) [Валеев Р.Р., Колесников Д.В., Буддо И.В., Ильин А.И., Аксеновская А.А., Черкасов Н.А., Агафонов Ю.А., Гринченко В.А. Подход к решению проблемы дефицита воды для системы поддержания пластового давления нефтяных месторождений Восточной Сибири (на примере Среднеботуобинского НГКМ) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2019. № 1. С. 55–67]. <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-1-55-67>.

Vanyan L.L., 1997. *Electromagnetic Sounding*. Nauchny Mir, Moscow, 218 p. (in Russian) [Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 218 с.].

Zakharkin A.K., 1981. Methodological Recommendations for Electrical Prospecting by the TEM Method with the Cycle Equipment. Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials, Novosibirsk, 98 p. (in Russian) [Захаркин А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «Цикл». Новосибирск: СНИИГГиМС, 1981. 98 с.].