

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.837

DOI: 10.15372/KZ20220204

ВОЗМОЖНОСТИ МАЛОГЛУБИННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ГАЗОГИДРАТНЫХ
СКОПЛЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Е.В. Мурзина^{1,3}, А.В. Поспеев^{1,2}, И.В. Буддо^{1–3}, М.В. Шарлов³, И.К. Семинский^{1,3},
Н.В. Мисюркеева^{1,3}, И.А. Шелохов^{1,3}

¹ Институт земной коры СО РАН,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия; mkv@sigma-geo.ru, avp@crust.irk.ru, sharlov@sigma-geo.ru

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; biv@crust.irk.ru

³ ООО СИГМА-ГЕО, 664039, Иркутск, ул. Звездинская, 6, Россия;

iks@sigma-geo.ru, mnv@sigma-geo.ru, sia@sigma-geo.ru

Известно, что территория севера Западной Сибири является одним из перспективных регионов российской Арктики по запасам альтернативных источников топлива, в частности газовых гидратов. По результатам интерпретации данных нестационарных площадных электромагнитных зондирований в криолитозоне, выполненных на одной из площадей Надымского района Ямало-Ненецкого автономного округа на глубинах 100–220 м, выявлены геоэлектрические аномалии повышенных значений удельного электрического сопротивления, сопровождаемые проявлением индукционно-вызванной поляризации. Эти аномалии авторы ассоциируют с возможным проявлением в толще криолитозоны скоплений газовых гидратов. Для обоснования применимости метода зондирования становлением поля в ближней зоне в малоглубинной модификации при картировании подмерзлотных геоэлектрических аномалий в криолитозоне в работе дается описание математического эксперимента. В основу эксперимента положены эмпирические электромагнитные данные. В результате математического моделирования показано, что применение электромагнитных зондирований становлением поля в ближней зоне позволяет оценить проводимость и поляризуемость верхней части разреза исследуемой территории и выделить в криолитозоне аномалии, которые, вероятно, связаны с гидратосодержащими отложениями.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, криолитозона, газогидраты, зондирование становлением поля в ближней зоне, индукционно-вызванная поляризация, удельное электрическое сопротивление.

CAPABILITIES OF SHALLOW-DEPTH TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS
FOR IDENTIFICATION OF GAS-HYDRATE ACCUMULATIONS IN THE CRYOLITHOZONE
OF THE NORTHERN REGIONS OF WESTERN SIBERIA

E.V. Murzina^{1,3}, A.V. Pospeev^{1,2}, I.V. Buddo^{1–3}, M.V. Sharlov³, I.K. Seminskiy^{1,3},
N.V. Misyurkeeva^{1,3}, I.A. Shelohov^{1,3}

¹Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Lermontova str. 128, Irkutsk, 664033, Russia; mkv@sigma-geo.ru

²Irkutsk National Research Technical University, Lermontova str. 83, Irkutsk, 664074, Russia

³ LLC SIGMA-GEO, Zvezdinskaya str. 6, Irkutsk, 664039, Russia

The territory of the north of Western Siberia is known as one of the promising regions of the Russian Arctic in terms of reserves of alternative fuel sources, in particular, gas hydrates. According to the results of interpretation of the data of 3D transient electromagnetic method (TEM) in the cryolithozone, performed in the Nadym district of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug at depths of 100–220 m, geoelectric anomalies of increased electrical resistivity values were revealed, accompanied by the induced polarization anomalies. The authors associate the mentioned anomalies with the possible accumulations of gas hydrates in the cryolithozone. To justify the applicability of the transient electromagnetic method in the near field zone in a shallow modification for mapping subpermafrost geoelectric anomalies in the cryolithozone, a description of a mathematical experiment is presented in the paper. The experiment is based on empirical electromagnetic data. As a result of mathematical modeling, it is shown that the use of transient electromagnetic method makes it possible to estimate the conductivity and polarizability of the upper part of the section of the study area and to identify anomalies in the cryolithozone, which are probably associated with hydrate-bearing deposits.

Key words: permafrost, cryolithozone, gas hydrate, transient electromagnetic method, TEM, induced polarization, resistivity.

ВВЕДЕНИЕ

На территории российской Арктики в последние десятилетия проводятся активный поиск и разведка месторождений углеводородов. Заметную роль при этом играют электромагнитные исследования, в том числе зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), направленные на изучение коллекторских свойств целевых интервалов как верхних, так и нижних ярусов геологического разреза [Ваньян, 1965]. Важной особенностью севера Западной Сибири является широкое распространение здесь криолитозоны – “толщи пород, находящихся в многолетнемерзлом, охлажденном и морозном состояниях” [Романовский, 1993, с. 7]. Состояние пород, находящихся при отрицательной температуре, определяется фазовым состоянием содержащейся в них воды.

Перспективным объектом изучения являются также газовые гидраты, приуроченные к мерзлым толщам. Газовые гидраты – это льдоподобные кристаллические соединения, которые образуются при определенных температурах и давлениях из молекул воды и низкомолекулярного газа (CH_4 , C_2H_6 , CO_2 , N_2 и др.) [Истомин, Якушев, 1992].

Поиск, разведка и разработка гидратосодержащих скоплений на территории российской Арктики ограничивается труднодоступностью региона и отсутствием отработанного комплекса геофизических методов, сопоставимого по эффективности с морскими исследованиями. В частности, за рубежом для поиска залежей газовых гидратов в шельфовой зоне получили распространение морская электроразведка CSEM (controlled source electromagnetic method) в комплексе с сейсморазведкой методом общей глубинной точки [Воробьев, Малюков, 2009]. Предпосылкой успешного применения малоуглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне (мЗСБ) для решения геокриологических задач является дифференцированность геоэлектрических характеристик осадочных пород в зависимости от их влажности и льдистости [Стогний, 2003; Кожевников и др., 2014; Агеев, 2019]. Эффективность применения метода мЗСБ для изучения как верхней части разреза, так и глубинной структуры вплоть до 3–4 км в геологических условиях Западной Сибири отражена в работах многих современных исследователей [Мисюркеева и др., 2017, 2021; Буддо и др., 2018, 2021; Рыбальченко и др., 2020; Buddo et al., 2017; Sharlov et al., 2017; Shelokhov et al., 2018; Dolgikh et al., 2019; Misyurkeeva et al., 2019, 2020]. Однако подтверждение результатов интерпретации геофизических данных, свидетельствующих об обнаружении газогидратных скоплений в мерзлой толще прямыми поисковыми методами (бурением скважин), практически отсутствует.

В настоящей статье авторы приводят и обсуждают результаты работ, проведенных методом мЗСБ на Тазовском полуострове (Надымский район). По результатам электроразведочных работ в разрезе криолитозоны выделяются высокоомные аномалии удельного электрического сопротивления (УЭС), сопровождаемые аномалиями индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) [Мурзина и др., 2016; Мисюркеева и др., 2017, 2021]. Подобного рода геоэлектрические структуры зафиксированы по результатам электромагнитных работ на территории российской Арктики и другими исследователями [Кожевников, Антонов, 2010; Афанасенков и др., 2015].

О ГАЗОВЫХ ГИДРАТАХ КРИОЛИТОЗОНЫ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Несмотря на то что большинство месторождений газовых гидратов, открытых к настоящему времени, приурочены к морским акваториям, первые признаки существования внетриконтинентальных залежей в областях распространения многолетнемерзлых пород (ММП) были обнаружены еще в начале 50-х гг. прошлого века в Восточной Сибири [Черский, Царев, 1973]. Известны крупные скопления газовых гидратов в мерзлых толщах в дельте р. Маккензи в Канаде и на северной Аляске, расположенные в пределах крупных нефтегазовых месторождений [Aregbe, 2017; Uchida et al., 2000]. Известно также о существовании гидратов газов в толще криолитозоны северных регионов Западной Сибири, выделенных в основном по косвенным признакам в пределах Мессояхского, Ямбургского и Бованенковского месторождений [Якушев и др., 2003; Чувилин и др., 2007; Якушев, 2009; Леонов, 2010; Chuvilin et al., 2000; Yakushev, Chuvilin, 2000].

При анализе условий существования газогидратных образований на севере Западной Сибири многие исследователи используют такие понятия, как зоны стабильности [Истомин, Якушев, 1992] и метастабильности газогидратов [Перлова, 2001; Якушев и др., 2003]. Под термином “зона стабильности газогидратов” (ЗСГ) в настоящее время понимается “часть литосферы и гидросферы Земли, термобарический и геохимический режимы которой соответствуют условиям устойчивого существования гидратов природных газов определенного состава” [Истомин, Якушев, 1992, с. 175].

Зона метастабильности газогидратов – это часть разреза многолетнемерзлых пород, находящаяся выше кровли ЗСГ, в которой температурный режим пород предполагает возможность проявления эффекта самоконсервации газовых гидратов при отрицательных температурах [Перлова, 2001]. В частности, на основе новейших данных

показано, что газовые гидраты могут образовываться и существовать длительное время в толще криолитозоны в песчаных отложениях с низкой степенью засоления [Чувиллин и др., 2019; Chuvilin et al., 2018].

О распространении скоплений газогидратов в палеобассейнах на суше известно не так много. Как показывают исследования в дельте р. Маккензи, их распространение возможно только в области распространения ММП, поскольку на суше зона стабильности гидратов формируется только в ассоциации с многолетнемерзлыми породами [Uchida et al., 2000]. Благоприятными для формирования подмерзлотных и внутримерзлотных газогидратных залежей является северная часть Западно-Сибирской плиты, которая отличается распространением сплошной криогенной толщи мощностью 200–400 м [Ершов, 1989; Леонов, 2010].

Как правило, известные крупные скопления газов в клатратной форме приурочены к районам нефтегазовых месторождений [Якушев и др., 2003; Чувиллин и др., 2007; Якушев, 2009] и могут состоять не только из катагенного газа, но и из биогенного газа, образующегося при микробиальной переработке органического вещества в осадочных отложениях [Якушев, 2009; Леонов, 2010; Yakushev, Chuvilin, 2000]. Чаще всего такие скопления находятся в ЗСГ, однако существуют исключения, в частности, таковым является Ямбургское газоконденсатное месторождение, которое расположено на Тазовском полуострове в 60 км к северу от участка исследований. Присутствие метастабильных газовых гидратов в толще мерзлых пород здесь было отмечено на основании активных газопроявлений и определения газосодержания в образцах керн в интервале глубин 70–120 м [Истомин, Якушев, 1992].

На примере Бованенковского месторождения В.Л. Бондаревым показано присутствие следов флюидомиграции в виде газопроявлений в интервалах надсеноманских отложений. Большинство газопроявлений приурочено к интервалу 38–120 м [Бондарев и др., 2008]. Метан в составе газов из этих проявлений имеет преимущественно биогенное происхождение, однако следует отметить, что в некоторых случаях в газах присутствует изотоп ^{13}C . Это может указывать на наличие в их составе некоторой доли эпигенетических (миграционных) газов [Бондарев и др., 2004].

Кроме того, на территории севера Западной Сибири широко распространены бугры пучения (булгуняхи) в котловинах спущенных термокарстовых озер (хасыреях). Часть бугров пучения рассматривается как следы гидровулканизма [Нежданов и др., 2011; Богдавленский и др., 2019]. Это указывает на возможность поступления с восходя-

щими потоками пластовых вод значительного количества метана, являющегося “строительным материалом” для формирования подмерзлотных скоплений газовых гидратов.

Из вышесказанного следует, что возможно существование стабильных газогидратных образований, характерных для некоторых районов с мощной толщей ММП, а также реликтовых, находящихся в метастабильном состоянии, для регионов, где мерзлые толщи после холодного периода полностью не протаивали. Метастабильные газовые гидраты являются не только потенциальным источником углеводородов, расположенным близко к поверхности, но и чрезвычайно неустойчивым и взрывоопасным веществом [Перлова и др., 2017], положение которого в разрезе необходимо учитывать при бурении и заложении глубоких скважин.

Картирование отложений с вероятным гидросодержанием по данным малоуглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне на территории севера Западной Сибири

Участок, результаты работ на котором представлены в статье и положены в основу дальнейшего синтетического моделирования, расположен на территории Тазовского полуострова, на водоразделе верховьев рек Хадуттэ и Табьяха. На схематической карте мерзлотных зон и подзон участок исследования находится в северной зоне и принадлежит к подзоне преимущественно эпигенетически промерзших отложений (рис. 1) [Баулин и др., 1967]. Эпигенетически промерзшими являются аллювиальные, озерно-аллювиальные, аллювиально-эстуарные отложения I–IV надпойменных террас, их промерзание происходило сверху вниз после седиментации.

Территория исследования находится в области разобщенного залегания современной и реликтовой мерзлых толщ, которые разделены межмерзлотными таликами. Мощность криогенной толщи достигает 400 м и более. Для данного района характерно также наличие многочисленных сквозных и несквозных таликов под руслами рек и озерами, участков резкого увеличения мощности мерзлых толщ [Баулин и др., 1967; Шполянская, 1981].

Измерения выполнялись с помощью цифровой телеметрической электроразведочной станции FastSnap, применяемой для проведения малоуглубинных исследований, по плотной сети наблюдений (100 точек наблюдений на 1 км²). В качестве зондирующей использовалась соосная установка с генераторной петлей 100 × 100 м и двумя приемными петлями 10 × 10 м. Удаление разнесенных петель от центра составило 0 м (одна соосная) и 100 м (две разнесенные).

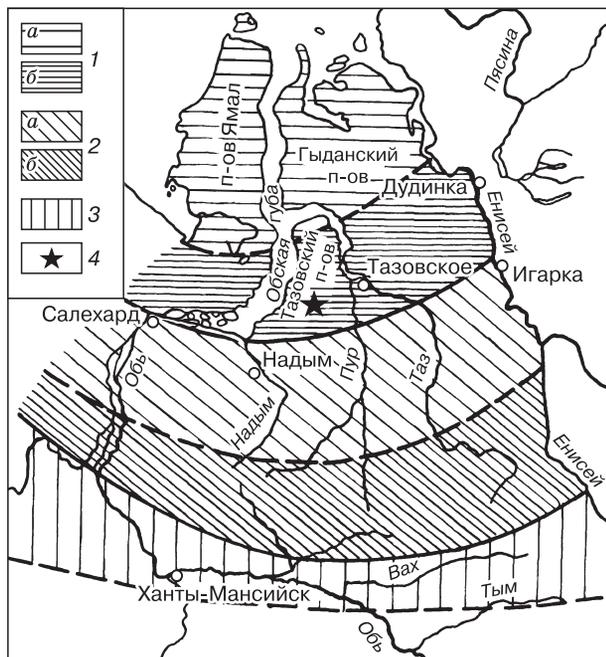


Рис. 1. Схематическая карта мерзлотных зон и подзон [Баулин и др., 1967].

1 – северная зона: а – подзона полигенетически промерзших отложений, б – подзона преимущественно эпигенетически промерзших отложений; 2 – центральная зона: а – подзона мерзлых минеральных грунтов и торфяников, б – подзона мерзлых торфяников; 3 – южная зона глубоко залегающих реликтовых мерзлых толщ; 4 – район проведения работ мЗСБ.

На рис. 2 представлен разрез по профилю мЗСБ длиной 13 500 м, ориентированному с юга на север. На геоэлектрическом разрезе выделяется верхний слой современной мерзлой толщи с повышенными значениями УЭС (от 500 до 2000), который достигает глубины 80–100 м. Этот горизонт мерзлых пород характеризуется резким увеличением значений УЭС по сравнению с нижележащими толщами (см. рис. 2). Он представлен озерно-аллювиальными, аллювиально-морскими и ледниково-морскими отложениями четвертичного возраста [Палеоген..., 1978]. Учитывая геокриологические условия участка исследования [Ершов, 1989], высокоомный горизонт, выделенный в верхней части разреза, ассоциируется с областью развития ММП и характеризуется повышенной льдистостью пород и температурой -5°C .

На профиле, построенном по данным мЗСБ (см. рис. 2), в приподошвенной части современного слоя мерзлых пород (УЭС 500–2000 Ом·м), выделяется неоднородный слой (интервалы 2.0–11.6, 12.2–13.1 км), подошва которого имеет вид высокоомных “кармашков”. В данном интервале УЭС пород понижается до 20–80 Ом·м, местами увеличиваясь до 150–300 Ом·м. Мощность h этого слоя также довольно изменчива – от 50 до 160 м. Интервал представлен преимущественно отложениями кортиковской толщи олигоцена – песками белыми и светло-серыми, плохо сортированными с линзами гравелитов. Характерно обилие каолина в виде заполнителя гнезд, линзообразных прослоев и окатышей [Палеоген..., 1978].

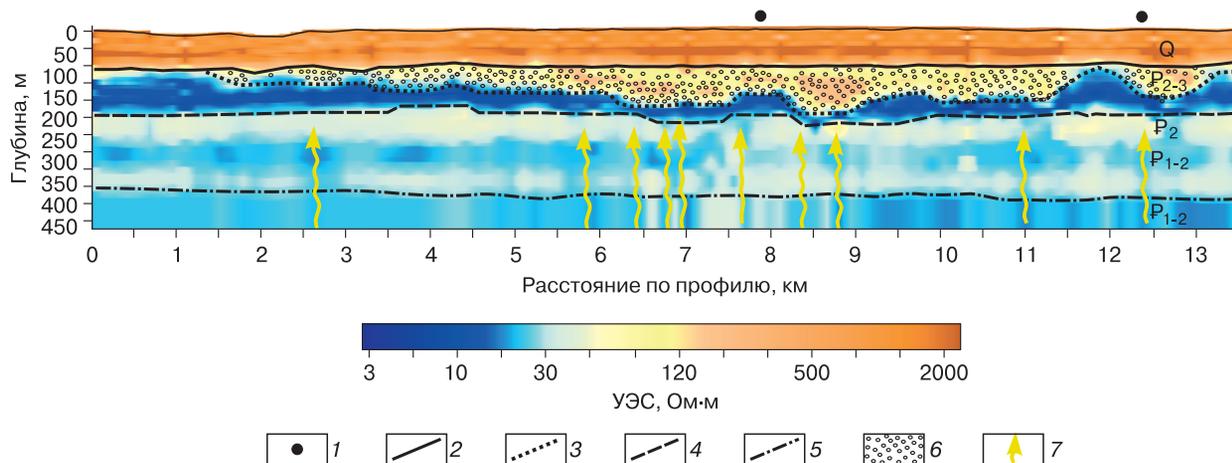


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по линии профиля на участке работ мЗСБ, расположенном на водоразделе верховьев рек Хадутта и Табьяха.

1 – бугор пучения; 2 – предполагаемая подошва верхнего слоя современной мерзлой толщи; 3 – предполагаемая подошва слоя мерзлых гидратосодержащих толщ в приподошвенной части современной мерзлоты; 4 – предполагаемая подошва межмерзлотного талика и кровли толщи реликтовых мерзлых пород; 5 – подошва нижнего реликтового слоя мерзлых пород; 6 – предполагаемые скопления гидратосодержащих отложений; 7 – предполагаемые каналы флюидомиграции. Q – четвертичные отложения; P₂₋₃ – отложения олигоцена; P₂ – отложения эоцена; P₁₋₂ – палеоцен-эоценовые отложения.

На графике распределения температуры по глубине [Ершов, 1989] в интервале 100–200 м температура горизонта повышается с глубиной от -4 до -2 °С. Значительное понижение УЭС относительно вышележащего высокоомного горизонта может быть также связано с уменьшением льдистости с глубиной.

Ниже по разрезу присутствуют талики, которые преимущественно залегают под слоем современных мерзлых толщ. По данным мЗСБ, им соответствуют значения УЭС от 5 до 10 Ом·м.

Реликтовый нижний слой мерзлой толщи находится в толще эоцен-палеоценовых отложений [Палеоген..., 1978]. По данным мЗСБ (см. рис. 2), ему соответствуют пониженные значения УЭС – от 25 до 65 Ом·м, а мощность его достигает предположительно 200 м. Кровля реликтовой толщи, по данным мЗСБ, расположена на глубине около 200 м, подошва на глубине 300–380 м. Отложения представлены чередованием слоев песков мелко- и среднезернистых, диатомитовых и опоковидных глин. Для данного интервала глубин характерны температуры $-2...0$ °С [Ершов, 1989]. С глубиной температура пород сравнительно быстро повышается до значений, при которых начинаются фазовые переходы воды, однако благодаря эффекту “нулевой завесы” породы могут оставаться в мерзлом состоянии достаточно долго [Баулин и др., 1967; Шполянская, 1981; Ершов, 1989].

Выявленные по данным ЗСБ аномалии в виде высокоомных “кармашков” в приподошвенной части современной толщи мерзлых пород, вероятно, можно связать как с локальным увеличением мощности современной мерзлоты, так и с возможным наличием гидратосодержащих отложений в разрезе [Мисюркеева и др., 2017].

В соответствии с картой районирования Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [Конторович, 2008], площадь работ расположена на территории Уренгойской нефтегазоносной района Надым-Пуровской нефтегазоносной области. При этом известно, что на исследуемой территории, на глубинах 1100–1500 м в сеноманском ярусе, находится гигантская газовая залежь. Сеноманская продуктивная толща характеризуется значительной неоднородностью. Наиболее распространены в разрезе мелкозернистые песчаники (пески) и алевролиты (алевриту). Для песчано-алевролитовых пород характерна слабая сцементированность. Песчаники и крупнозернистые алевриту с каолиновым цементом обладают хорошими коллекторскими свойствами. Мощность нефтегазовых коллекторов в пределах рассматриваемой территории изменяется и составляет 600–650 м. Отмечено пространственное совпадение аномалий, выявленных в криолитозоне территории, с контуром предполагаемой газовой за-

лежи в сеноманских отложениях (рис. 3, з) [Мисюркеева и др., 2017].

Под высокоомными аномалиями, в нижележащих отложениях эоцен-палеоцена (в реликтовой мерзлой толще), наблюдаются субвертикальные аномалии пониженных УЭС относительно вмещающих отложений, которые, вероятно, можно связать с каналами миграции газа (см. рис. 2). Отмечено пространственное совпадение контуров аномалий с положением бугров пучения на поверхности земли (см. рис. 3, а, б, з), что говорит о вероятной их глубинной природе формирования [Нежданов и др., 2011; Богоявленский и др., 2019].

При проведении работ мЗСБ установлено: 1) наличие высокоомных “кармашков” в приподошвенной части современной мерзлой толщи; 2) присутствие на геоэлектрических разрезах аномалий пониженного УЭС под выявленными высокоомными аномалиями в криогенной толще, интерпретируемых как следы флюидомиграции [Мурзина и др., 2016; Мисюркеева и др., 2017, 2021]; 3) присутствие бугров пучения на поверхности, ассоциируемых со следами флюидомиграции [Нежданов и др., 2011; Мисюркеева и др., 2017, 2021; Богоявленский и др., 2019] над выявленными аномалиями УЭС; 4) совпадение геоэлектрических аномалий и контуров предполагаемой газовой залежи в сеноманских отложениях [Мисюркеева и др., 2017]. На основе установленных фактов предполагается связь выявленных в криолитозоне высокоомных аномалий с вероятными гидратосодержащими отложениями.

Оценка чувствительности сигналов мЗСБ к выделению подмерзлотных аномалий посредством математического моделирования

Для оценки чувствительности нестационарных зондирований к вариациям геоэлектрических характеристик криолитозоны (удельного электрического сопротивления и индукционно-вызванной поляризации пород) и расположенных ниже горизонтов пород было проведено математическое моделирование индукционных переходных характеристик. Суть его заключалась в расчете кривых ЗСБ для выбранной физико-геологической модели, наложении на них электромагнитных (ЭМ) помех, характерных для исследуемой территории, и последующего решения обратной задачи электроразведки. При проведении численного эксперимента расчеты осуществлялись для площадной сети наблюдений методом мЗСБ, применяемой на исследуемой территории.

По результатам интерпретации данных мЗСБ сформированы упрощенные модели (M_1 – стандартная модель многолетнемерзлых пород; M_2 – модель криолитозоны территории с линзой предполагаемых гидратосодержащих отложений под

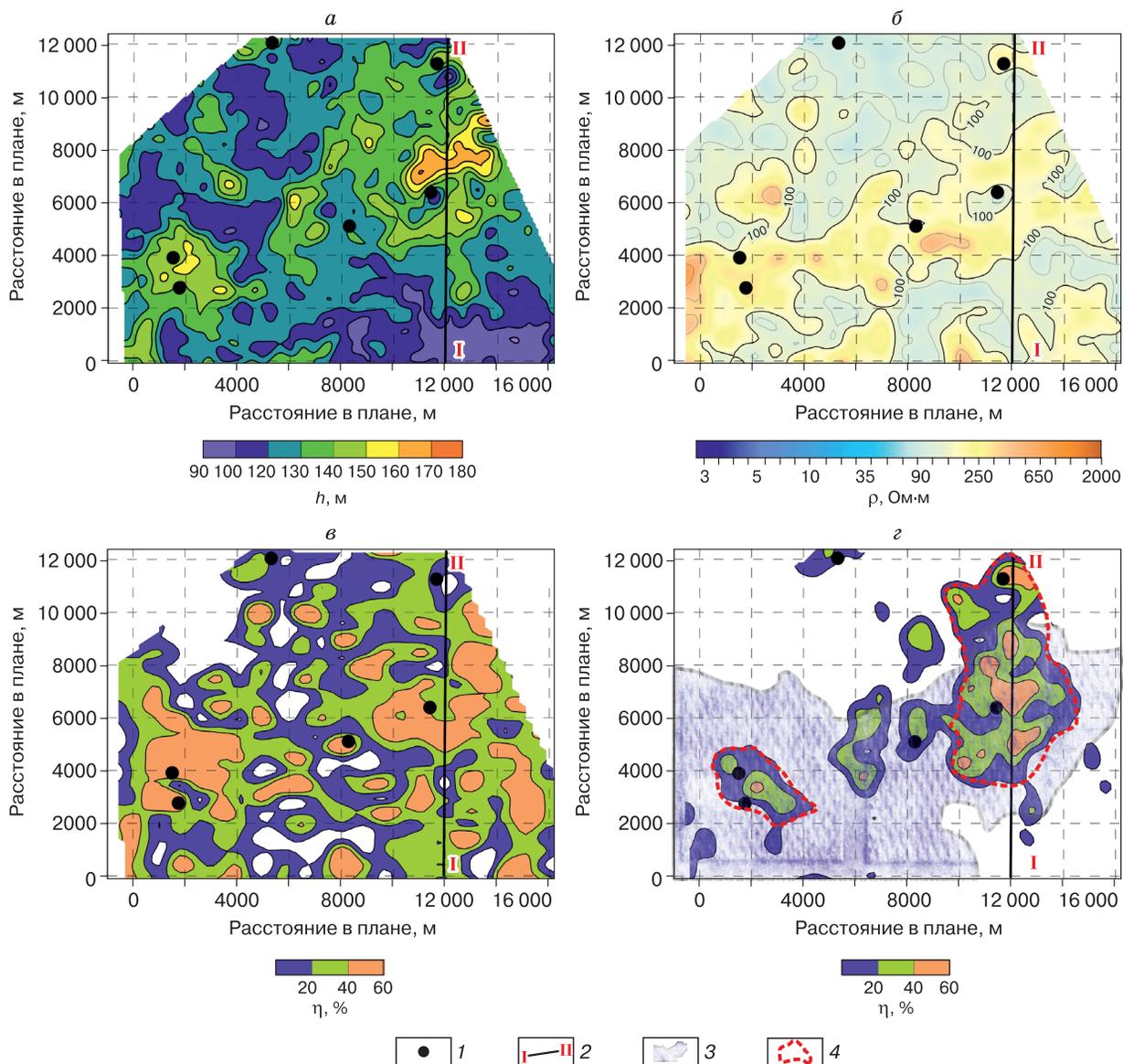


Рис. 3. Результаты интерпретации данных мЗСБ на водоразделе верховьев рек Хадутгэ и Табьяха.

a – карта мощности (h) верхней современной мерзлой толщи, включая предполагаемую толщу гидратосодержащих отложений (глубина 0–200 м); *б* – карта нормированного УЭС (ρ) верхней мерзлой толщи, включая предполагаемую толщу гидратосодержащих отложений (глубина 0–200 м); *в* – карта коэффициента поляризуемости (η) верхней современной мерзлой толщи (глубина 0–90 м); *г* – карта коэффициента поляризуемости высокоомного слоя (η) в приподошвенной части верхней мерзлой толщи (глубина 90–200 м). 1 – бугор пучения; 2 – положение геоэлектрического профиля; 3 – контур предполагаемой газовой залежи в сеноманских отложениях; 4 – контур предполагаемой залежи гидратосодержащих отложений в межмерзлотном слое.

толщей ММП), положенные в основу моделирования (табл. 1).

На участке исследований слой 1 (верхний слой современной мерзлой толщи) до глубины 100 м представлен высокольдистыми породами с температурами около -5°C и УЭС $\rho = 2000$ Ом·м. Параметры поляризации мерзлых пород по Кожевникову: коэффициент поляризуемости $\eta \approx 70\%$, время релаксации $\tau = 3 \cdot 10^{-5}$ с, степень

поляризации $C = 0.9$ [Кожевников, Антонов, 2010].

Залегающий непосредственно ниже льдистых мерзлых пород слой 2, в котором предполагается существование газовых гидратов, представлен песками с прослоями алевролитов, глин алевролитистых, слюдистых и опоковидных, описывается достаточно низкими значениями УЭС от 30 до 50 Ом·м. Для данного интервала глубин характер-

ны температуры $-4...-2$ °С, здесь предполагается присутствие порового льда, что является благоприятным условием как для гидратонакопления, так и для сохранности реликтовых газовых гидратов [Чувиллин и др., 2019].

Если в толще криолитозоны присутствуют гидратосодержащие отложения, то из-за отсутствия диссоциации кристаллизационной воды в молекулах газогидратов их скопления будут отличаться высокими УЭС. По данным лабораторных исследований, УЭС газогидратов составляет около 150 Ом·м [Пермяков и др., 2017]. С учетом неоднородности изучаемых геологических объектов для линзы гидратосодержащих отложений УЭС может составлять 110–300 Ом·м. Проявление эффекта ВПИ в высокоомном слое в приподошвенной части говорит о присутствии льда в линзе. Можно допустить, что параметры поляризации газовых гидратов аналогичны свойствам мерзлых пород: $\eta \approx 80\%$, $\tau = 2 \cdot 10^{-4}$ с, $C = 0.9$. В приподошвенной части слоев 1 и 2 расположен слой 3 – талики. Среднее значение УЭС составляет 9 Ом·м. Ниже таликов залегают реликтовые мерзлые толщи (слой 4), характеризующиеся низкими значениями $\rho = 30$ Ом·м, мощностью 200 м.

Решение прямых и обратных задач в рамках принятых моделей M_1 и M_2 осуществлялось с применением программного обеспечения Model 3 [Агафонов и др., 2006]. Синтетические переходные характеристики, полученные в рамках модельного эксперимента, рассчитывались до времени 10 мс. Длительность рассчитываемых в рамках модельного эксперимента синтетических переходных характеристик выбиралась исходя из необходимой глубины изучения толщи ММП (не менее 400 м) и геоэлектрических параметров задаваемых моделей. Первый тип кривой (рис. 4) характерен для многолетнемерзлых пород (см. табл. 1, M_1). Вто-

рой тип кривой (см. рис. 4) характерен для модели ММП в случае присутствия в их приподошвенной части высокоомного тела, ассоциирующегося с линзой гидратосодержащих отложений в разрезе (см. табл. 1, M_2).

Рассчитывалось несколько сотен откликов, которые осложнялись добавлением ЭМ шума, в соответствии с параметрами зашумленности реальных полевых данных.

Усредненные для площади параметры шума определялись в программном обеспечении TEM-Processing путем обработки набора реальных шумовых записей, полученных с аппаратурой Fast-Snar [Шарлов и др., 2010] на одном из участков съемки мЗСБ в Западной Сибири [Sharlov et al., 2017]. Каждая шумовая запись представляла собой ряд измеренных фоновых значений электромагнитного шума (осциллограмма шума с арифметическим шагом по времени) при выключенном токе в генераторной петле. Для определения максимальной амплитуды разброса значений шума (уровня шума) производился пересчет шумовой записи на логарифмическую сетку времен, соответствующую временному шагу отсчетов синтетической кривой. Далее уровень шума масштабировался к уровню реально измеряемого сигнала, т. е. выполнялось нормирование на величину тока в генераторной петле ($I \sim 17-20$ А) и \sqrt{N} , где N – количество накоплений, выполняемых при измерении реальных кривых ($N \sim 1600...2400$ накоплений). На рис. 4 приведены примеры синтетических откликов, рассчитанных для разных

Таблица 1. Референтные модели

Номер слоя	h , м	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	C
<i>Геоэлектрическая модель ММП (M_1)</i>					
1	100	2000	70	$3 \cdot 10^{-5}$	0.9
2	50	30	0	0	0
3	20	9	0	0	0
4	200	30	0	0	0
<i>Геоэлектрическая модель с линзой гидратосодержащих отложений под толщей ММП (M_2)</i>					
1	100	2000	70	$3 \cdot 10^{-5}$	0.9
2	100	200	80	$2 \cdot 10^{-4}$	0.9
3	20	9	0	0	0
4	200	30	0	0	0

Примечание. h – мощность; ρ – удельное электрическое сопротивление; η – коэффициент поляризуемости; τ – время релаксации; C – степень поляризации.

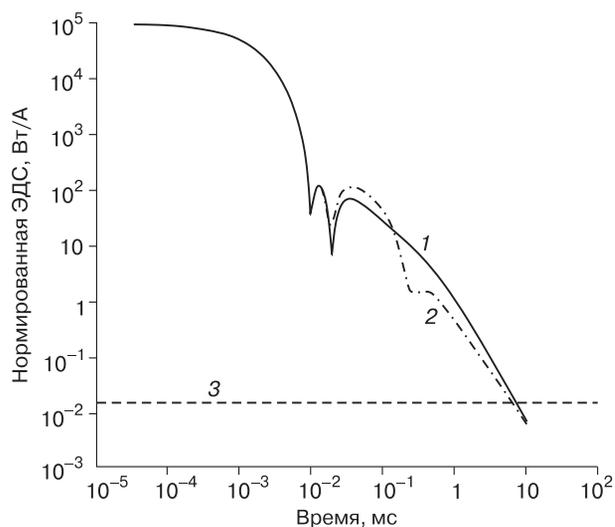


Рис. 4. Графики электродвижущей силы сигнала ЗСБ для моделей M_1 и M_2 .

1 – кривая ЭДС для соосной петли над поляризующимся разрезом мерзлой толщи ($Qq(M_1)$); 2 – кривая ЭДС для соосной петли над поляризующимся разрезом мерзлой толщи с линзой гидратосодержащих отложений ($Qq(M_2)$); 3 – уровень шума.

Таблица 2. Модели подмерзлотной аномалии, ассоциируемой с гидратосодержащими отложениями (M_2) в исходную (M_1)

№ п/п	УЭС, %	η , %	h , м
1	10	20	35
2	20	30	40
3	30	40	45
4	40	50	50
5	50	55	60
6	60	60	70
7	70	65	75
8	80	70	85
9	90	80	90

Примечание. УЭС – удельное электрическое сопротивление; η – коэффициент поляризуемости; h – мощность.

геоэлектрических условий с вынесенным на график уровнем шума, который не превышает 0.015 мкВ/А.

Путем интерполяции описанных ранее эталонных моделей (см. табл. 1) была сформирована объемная геоэлектрическая модель геологического разреза с присутствием газогидратной залежи под верхней толщей ММП. Интерполяция модели происходила таким образом, что с каждым шагом анализируемому подмерзлотному слою добавлялось по 10 % от параметров УЭС, η , h искомого объекта (табл. 2). Параметры поляризуемости задавались по первым двум горизонтам и подмерзлотному высокоомному объекту, ассоциируемому

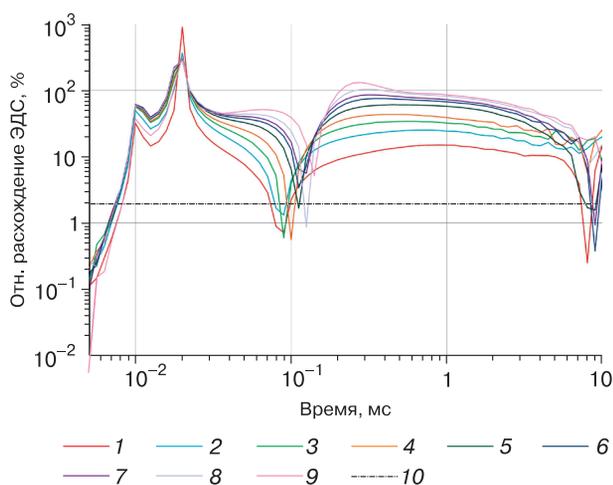


Рис. 5. График относительного расхождения (%) между синтетическими зашумленными сигналами ЭДС от фоновой модели и модели с последовательным увеличением аномального вклада (см. табл. 2).

1–9 – расхождения между синтетическими кривыми мЗСБ в соответствии с табл. 2; 10 – реальный уровень электромагнитного шума по фактическим данным.

Таблица 3. Результаты синтетического моделирования сигналов мЗСБ

№ п/п	$\delta_{УЭС}$, %	δ_{η} , %	Δ_h , %
1	31	43	9
2	27	40	9
3	22	30	5
4	16	20	5
5	10	25	10
6	11	17	13
7	11	7	13
8	6	5	2
9	10	1	5

Примечание. Среднеквадратическая погрешность определения параметров: $\delta_{УЭС}$ – удельного электрического сопротивления, δ_{η} – коэффициента поляризуемости, Δ_h – мощности.

со скоплениями газогидратов. Время релаксации и степень поляризации закреплялись в соответствии с мерзлотными показателями поляризации по Н.О. Кожевникову [Кожевников, Антонов, 2010].

На рис. 5 приведен график относительного расхождения между соосными кривыми мЗСБ, рассчитанными по моделям, полученным путем изменения параметров (УЭС, η , h) подмерзлотного слоя. Видно, что амплитуда аномалии составляет более 100 % и превышает уровень шума (2 %) в несколько раз. Это говорит о высокой чувствительности кривых ЗСБ к изменениям в подмерзлотном проводящем полупространстве.

Инверсия данных выполнялась в автоматическом режиме с применением алгоритмов решения некорректных задач по А.Н. Тихонову [Тихонов, Арсенин, 1986]. Учет априорной информации осуществлялся путем закрепления количества слоев в соответствии с геологической моделью и параметров первого мерзлотного поляризуемого слоя. В процессе решения обратной задачи необходимо было установить факт изменения геоэлектрической обстановки при появлении линзы гидратосодержащих отложений под толщей ММП.

Совершалось несколько циклов инверсии. Первоначально определялась модель УЭС и мощность подмерзлотной аномалии. Затем уточнялась модель УЭС и мощность аномалии с подбором параметров поляризуемости. В качестве функционала минимизации применялось логарифмированное среднеквадратическое расхождение практической и теоретической кривых, которое в процессе решения обратной задачи стремится к нулю.

При достижении невязки менее 3 % оценивалась чувствительность кривых зондирования к электромагнитной аномалии. Для этого рассчитывалась среднеквадратическая погрешность δ (%) искомого параметров (табл. 3) для групп кривых, сформированных в соответствии с табл. 2.

Из результатов моделирования кривых мЗСБ следует, что для условий южной части Тазовского полуострова (район междуречья Хадуттэ–Табьяха) можно уверенно выделять высокоомные аномалии УЭС относительной величиной 40 % при сопутствующих аномалиях $\eta \sim 50\%$ и увеличении мощности аномалии более чем на 50 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленные посредством интерпретации данных нестационарных электромагнитных зондирований особенности геоэлектрического разреза криолитозоны участка работ, выполненных на одной из площадей Надымского района Ямало-Ненецкого автономного округа, на водоразделе верховьев рек Хадуттэ и Табьяха, позволяют сделать следующие выводы:

- полученные по данным полевых экспериментов мЗСБ высокоомные аномалии УЭС, сопровождаемые аномалиями ВПИ, могут быть связаны с изменением структуры ММП, а также с возможностью существования газовых гидратов в криогенной толще;

- совпадение пространственного положения контуров газовых залежей в отложениях сеноманского яруса и контуров аномалий, выявленных по данным мЗСБ в приповерхностной части разреза, может говорить о глубинной природе формирования газогидратных скоплений в толще ММП;

- субвертикальные аномалии пониженного УЭС под высокоомными аномалиями могут характеризовать проявления глубинной флюидомиграции;

- в условиях геологического разреза севера Западной Сибири по данным мЗСБ можно уверенно выделять в толще криолитозоны подмерзлотные аномалии повышенного УЭС относительной величиной 40 % при сопутствующих аномалиях $\eta \sim 50\%$ и увеличении мощности более чем на 50 м;

- целесообразно рекомендовать исследование бурением выявленных геофизических аномалий для уточнения их природы и оценки возможной связи с залежами газовых гидратов.

Благодарности. Авторы признательны генеральному директору ООО «СИГМА-ГЕО» к.т.н. Ю.А. Агафонову за возможность использования материалов. Авторы благодарны профессору, д.г.-м.н. Н.О. Кожевникову за помощь в формировании структуры статьи и конструктивные предложения. Хотелось бы отметить неоценимый труд к.г.-м.н. В.Е. Тумского и к.г.-м.н. Е.М. Чувилина в подготовке окончательной версии статьи, а также справедливую критику рецензентов, которая позволила существенно улучшить текст.

Литература

- Агафонов Ю.А., Поспеев А.В., Суков Л.В.** Система интерпретации данных и основные направления применения нестационарных электромагнитных исследований на юге Сибирской платформы // Приборы и системы разведочной геофизики, 2006, № 1, с. 33–36.
- Агеев Д.В.** Применение зондирования становлением поля для решения гидрогеологических задач в условиях криолитозоны на примере Новоуренгойского месторождения // Инж. изыскания, 2019, т. XIII, № 3, с. 40–47.
- Афанасенков А.П., Волков Р.П., Яковлев Д.В.** Аномалии повышенного электрического сопротивления под слоем многолетнемерзлых пород – новый поисковый признак залежей углеводородов // Геология нефти и газа, 2015, № 6, с. 40–51.
- Баулин В.В.** Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности / В.В. Баулин, Е.Б. Белопухова, Г.И. Дубиков, Л.М. Шмелев. М., Наука, 1967, 213 с.
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Мажаров А.В. и др.** Дегазация земли в Арктике: Дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического сейсмического выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: Экология и экономика, 2019, № 1 (33), с. 88–105.
- Бондарев В.Л.** Условия формирования непромышленных скоплений УВГ в надпродуктивных отложениях полуострова Ямал и геохимические методы диагностики их природы / В.Л. Бондарев, М.Ю. Миротворский, Р.М. Шайдуллин, В.Т. Гудзенко. М., НПЦ «Геохимия» Надымгазпром, 2004, 182 с.
- Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю., Зверева В.Б. и др.** Газогеохимическая характеристика надсеноманских отложений полуострова Ямал (на примере Бованенковского нефтеконденсатного месторождения) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2008, № 5, с. 22–34.
- Буддо И.В., Смирнов А.С., Мисюркеева Н.В. и др.** Интегрирование данных электромагнитных и сейсморазведочных исследований на всех стадиях геологоразведочных работ: от поисково-оценочного этапа до разработки месторождения углеводородов // Экспозиция нефть–газ, 2018, окт., № 6 (66), с. 24–28.
- Буддо И.В., Семинский И.К., Шелохов И.А. и др.** Электромагнитные методы для изучения криолитозоны в условиях Арктики: предпосылки применения и экспериментальные данные // Тез. докл. Междунар. конф. «Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике» (Салехард, 8–12 нояб. 2021 г.). Салехард, 2021, с. 71–74.
- Ваньян Л.Л.** Основы электромагнитных зондирований. М., Недра, 1965, 109 с.
- Воробьев А.Е.** Газовые гидраты. Технологии воздействия на нетрадиционные углеводороды / А.Е. Воробьев, В.П. Малюков. М., РУДН, 2009, 289 с.
- Ершов Э.Д.** Геокриология СССР. Западная Сибирь. М., Недра, 1989, 454 с.
- Истоин В.А.** Газовые гидраты в природных условиях / В.А. Истоин, В.С. Якушев. М., Недра, 1992, 236 с.
- Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю.** Инверсия индукционных характеристик двухслойных сред с учетом быстро устанавливающейся поляризации // Геология и геофизика, 2010, т. 51, № 6, с. 905–918.
- Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Захаркин М.А. и др.** Поиск таликов методом ЗСБ в условиях интенсивного проявления индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2014, т. 55, № 12, с. 1815–1827.

- Конторович А.Э.** Геология нефти и газа: Избр. тр. Т. I. Геология нефти и газа Сибири. Новосибирск, СНИИГГиМС, 2008, 540 с.
- Леонов С.А.** Перспективы гидратоносности надсеноманских отложений севера Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2010, 24 с.
- Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. и др.** Результаты применения электромагнитных исследований 3D ЗСБ и мЗСБ в условиях Арктической зоны Западной Сибири // "Геомодель 2017" (Геленджик, Россия, 11–14 сент. 2017 г.) [Электронный ресурс]. DOI: 10.3997/2214-4609.201702225.
- Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А. и др.** Внутреннее строение многолетнемерзлых пород севера Западной Сибири по данным современных геофизических исследований // Тез. докл. Междунар. конф. "Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике" (Салехард, 12–18 нояб. 2021 г.). Салехард, 2021, с. 297–300.
- Мурзина Е.В., Мисюркеева Н.В., Буддо И.В. и др.** Результат применения автоматической инверсии для исследования многолетнемерзлых пород методом мЗСБ // Материалы 13-го Междунар. науч.-практ. семина. "Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых" (Санкт-Петербург, 2016 г.). СПб., С.-Петербург. горн. ун-т, 2016, с. 119–122.
- Нежданов А.А., Новопапин В.Ф., Огибин В.В. и др.** Грязевой вулканизм на севере Западной Сибири // Сб. науч. тр. ООО "ТюменНИИгипрогаз": Геология и геологоразведка. Тюмень, Флат, 2011, с. 73–79.
- Палеоген и неоген Сибири** / Под ред. С.Б. Шацкого. Новосибирск, Наука, 1978, 168 с.
- Перлова Е.В.** Особенности газосодержания многолетнемерзлых пород на примере северо-западной части п-ова Ямал: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2001, 174 с.
- Перлова Е.В., Микляева Е.С., Леонов С.А. и др.** Газовые гидраты полуострова Ямал и прилегающего шельфа Карского моря как осложняющий фактор освоения региона // Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России, 2017, № 3 (31), с. 255–262.
- Пермяков М.Е., Манченко Н.А., Дучков А.Д. и др.** Моделирование и измерение электросопротивления гидратосодержащих песчаных образцов в лабораторных условиях // Геология и геофизика, 2017, т. 58, № 5, с. 792–800.
- Романовский Н.Н.** Основы криогенеза литосферы. Учеб. пособие. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 336 с.
- Рыбальченко В.В., Трусов А.И., Буддо И.В. 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 // Газ. пром-сть, 2020, № 11/808, с. 20–28.
- Стогний В.В.** Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии. Якутск, Изд-во СО РАН, Якут. фил., 2003, 124 с.
- Тихонов А.Н.** Методы решения некорректных задач. Учеб. пособие для вузов / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. М., Наука, 1986, 286 с.
- Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М.** Современные телеметрические электроразведочные станции "SGS-TEM" и "FastSnap". Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики, 2010, № 01 (31), с. 20–24.
- Шполянская Н.А.** Мерзлая зона литосферы Западной Сибири и тенденции ее развития. М., Изд-во Моск. ун-та, 1981, 168 с.
- Черский Н.В., Царев В.П.** Перспективы разработки газогидратных залежей // Исследования и рекомендации по усовершенствованию добычи полезных ископаемых в северных и восточных регионах СССР. Якутск, Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1973, ч. 1, 121 с.
- Чувиллин Е.М., Давлетшина Д.А., Лупачик М.В.** Гидратообразование в мерзлых и оттаивающих метанонасыщенных породах // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 2, с. 50–61.
- Чувиллин Е.М., Перлова Е.В., Баранов Ю.Б. и др.** Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. М., ГЕОС, 2007, 135 с.
- Якушев В.С.** Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М., ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.
- Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А. и др.** Газовые гидраты в отложениях материков и островов // Рос. хим. журн., 2003, т. XLVII, № 3, с. 80–90.
- Aregbe A.G.** Gas hydrate – properties, formation and benefit // Open J. Yangtze Oil and Gas, 2017, vol. 02, No. 01, p. 27–44.
- Buddo I.V., Misurkeeva N.V., Shelohov I.A. et al.** Experience of 3D transient electromagnetics application for shallow and hydrocarbon exploration within Western Siberia // Proc. of the 79th EAGE Conference & Exhibition 2017 (Paris, France, June 12–15, 2017). Paris, 2017.
- Chuvilin E., Bukhanov B., Davletshina D. et al.** Dissociation and self-preservation of gas hydrates in permafrost // Geosciences, 2018, vol. 8, p. 431.
- Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V.** Gas and gas hydrates in the permafrost of Bovanenkovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia // Polarforschung, 2000, vol. 68, p. 215–219.
- Dolgikh Y., Sanin S., Buddo I. et al.** Improving the efficiency of geophysical research based on the integration of seismic and modern electrical exploration // Proc. of the Conference Proceedings (Tyumen, March 2019). Tyumen, 2019, vol. 2019, p. 1–5.
- Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Shelohov I.A. et al.** New data on fluid dynamic processes in the Arctic Zone of Western Siberia based on the results of TEM, STEM electromagnetic studies and seismic CDP studies // Proc. of the Conference Proceedings (Tyumen, March 2019). Tyumen, 2019, vol. 2019, p. 1–6.
- Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Smirnov A.S. et al.** Shallow transient electromagnetic method application to study the Yamal Peninsula permafrost zone // Proc. of the "Geomodel 2020" (Gelendzhik, Russia, Sept. 7–11, 2020). Gelendzhik, 2020, vol. 2020, p. 1–6.
- Sharlov M.V., Buddo I.V., Misyurkeeva N.V. et al.** Transient electromagnetic surveys for high resolution near-surface exploration: basics and case studies // First Break, 2017, vol. 35 (9), p. 63–71.
- Shelokhov I.A., Buddo I.V., Smirnov A.S. et al.** Inversion of TEM responses to create a near surface velocity structure // First Break, 2018, vol. 36 (10), p. 47–51.
- Uchida T., Dallimore S., Mikati J.** Occurrences of natural gas hydrates beneath permafrost zone in Mackenzie delta: visual and X-ray imaginary // Ann. New York Academy of Sciences, 2000, vol. 912, p. 1021–1033.
- Yakushev V.S., Chuvilin E.M.** Natural gas and hydrate accumulation within permafrost in Russia // Cold Reg. Sci. Technol., 2000, vol. 31, p. 189–197.

References

- Agafonov Yu.A., Pospeyev A.V., Surov L.V. The system to interpretation data and main directions of application the result of non-stationary electromagnetic sounding to the South of Siberian craton. *Priboiy i sistemy razvedochnoj geofiziki* [Instruments and Systems of Exploration Geophysics], 2006, No. 1, p. 33–36 (in Russian).
- Ageev D.V. Solving of hydrogeological problems in permafrost zone conditions of the Novourenskogo deposits. *Inzhenernye izyskaniya* [Engineering Survey], 2019, vol. XIII, No. 3, p. 40–47 (in Russian).
- Afanasenkov A.P., Volkov R.P., Yakovlev D.V. Heightened electric resistivity anomaly under permafrost sediments layer as a new prospecting indicator for hydrocarbon deposit. *Geologiya nefi i gaza* [Oil and Gas Geology], 2015, No. 6, p. 40–51 (in Russian).
- Baulin V.V., Belopuhov E.B., Dubikov G.I., Shmelev L.M. *Geokriologicheskie usloviya Zapadno-Sibirskoj nizmennosti* [Geocryological Conditions of the West Siberian Lowland]. Moscow, Nauka, 1967, 213 p. (in Russian).
- Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Mazharov A.V. et al. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula. *Arktika: Ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2019, No. 1 (33), p. 88–105, DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105.
- Bondarev V.L., Mirotvorskij M.Yu., Shajdullin R.M., Gudzenko V.T. *Usloviya formirovaniya nepromyshlennykh skoplenij UVG v nadproduktivnykh otlozheniyah poluostrva Yamal i geohimicheskie metody diagnostiki ih prirody* [Conditions for the formation of non-industrial UVG accumulations in the supraproductive deposits of the Yamal Peninsula and geochemical methods for diagnosing their nature]. Moscow, NPC “Geohimiya” Nadyngazprom, 2004, 182 p. (in Russian).
- Bondarev V.L., Mirotvorskij M.Yu., Zvereva V.B. et al. Gas geochemical characteristics of the supra-Cenomanian deposits of the Yamal Peninsula (on the example of the Bovanenkovskoye oil condensate field). *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenij* [Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields], 2008, No. 5, p. 22–34.
- Buddo I.V., Smirnov A.S., Misyurkeeva N.V. et al. Integration of electromagnetic and seismic survey data at all stages of geological exploration: from the prospecting stage to the development of hydrocarbon fields. *Ekspozitsiya Neft’ Gaz* [Exposition Oil Gas], 2018, Oct., No. 6 (66), p. 24–28 (in Russian).
- Buddo I.V., Seminskij I.K., Shelohov I.A. et al. Electromagnetic studies for cryolithozone investigation in the Arctic settings: background of application and experimental data. In: Proc. of the Conference “Modern studies of cryosphere transformation and issues of geotechnical safety of structures in the Arctic”. Salekhard, 2021, p. 71–74 (in Russian).
- Vanyan L.L. *Osnovy elektromagnitnykh zondirovaniy* [Fundamentals of Electromagnetic Sounding]. Moscow, Nedra, 1965, 109 p. (in Russian).
- Vorobyev A.E., Malyukov V.P. *Gazovye gidraty. Tekhnologii vozdeystviya na netraditsionnye uglevodorody* [Gas hydrates. The impact of technology on unconventional hydrocarbons]. Moscow, RUDN, 2009, 289 p. (in Russian).
- Ershov E.D. *Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir’* [Geocryology of the USSR. Western Siberia]. Moscow, Nedra, 1989, 454 p. (in Russian).
- Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas Hydrates in Natural Conditions]. Moscow, Nedra, 1992, 236 p. (in Russian).
- Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Inversion of IP-affected TEM responses of a two-layer earth. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, No. 6, p. 905–918.
- Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., Zaharkin M.A. et al. TEM surveys for search of taliks in areas of strong fast-decaying IP effects. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, No. 12, p. 1815–1827.
- Kontorovich A.E. *Geologiya nefi i gaza: Izbrannye trudy. T. I. Geologiya nefi i gaza Sibiri* [Geology of oil and gas: Selected works. Vol. I. Geology of oil and gas in Siberia]. Novosibirsk, SNIIGGiMS, 2008, 540 p. (in Russian).
- Leonov S.A. Prospects for the hydration potential of the supra-Cenomanian deposits in the north of Western Siberia: Abstract of the thesis. Moscow, 2010, 24 p. (in Russian).
- Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A. et al. TEM and sTEM Electromagnetic Studies Application in Geological Settings of Arctic Zone of Western Siberia. In: Proc. of the Conference of “Geomodel’ 2017” (Gelendzhik, Russia, Sept. 11–14, 2017), DOI: 10.3997/2214-4609.201702225.
- Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Sholokhov I.A. et al. Permafrost rocks structure within the north of Western Siberia from modern geophysical studies. In: Proc. of the Conference “Modern studies of cryosphere transformation and issues of geotechnical safety of structures in the Arctic”. Salekhard, 2021, p. 297–300 (in Russian).
- Murzina E.V., Misyurkeeva N.V., Buddo I.V. et al. The result of the application of automatic inversion for permafrost studies using high-density TEM soundings. In: Proc. of 13th scientific and practical seminar “Application of modern electric exploration technology in prospecting mineral deposits”. Saint-Petersburg, Nov. 2016, p. 119–122 (in Russian).
- Nezhdanov A.A., Novopashin V.F., Ogibenin V.V. et al. Mud volcanism in the north of Western Siberia. In: *Sbornik nauchnykh trudov OOO “TyumenNIIgiprogaz”: Geologiya i geologorazvedka* [Collection of scientific papers of “TyumenNIIgiprogaz”: Geology and exploration]. Tyumen, Flat, 2011, p. 73–79 (in Russian).
- Shatsky S.B. (Ed.). *Paleogen i neogen Sibiri* [Paleogene and Neogene of Siberia]. Novosibirsk, Nauka, 1978, 168 p. (in Russian).
- Perlova E.V. Features of gas content of permafrost rocks on the example of the north-western part of the Yamal Peninsula. Dis. for the degree of Candidate of geol. and mineral. sciences. Moscow, 2001 (in Russian).
- Perlova E.V., Miklyaeva E.S., Leonov S.A. et al. Gas hydrates of the Yamal Peninsula and the adjacent shelf of the Kara Sea as a complicating factor in the development of the region. *Problemy resursnogo obespecheniya gazodobyvayushchikh rajonov Rossii* [Problems of Resource provision of gas-producing regions of Russia], 2017, No. 3 (31), p. 255–262 (in Russian).
- Permyakov M.E., Manchenko N.A., Duchkov A.D. et al. Laboratory modeling and measurement of the electrical resistivity of hydrate-bearing sand samples. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, No. 5, p. 792–800 (in Russian).
- Romanovskii N.N. *Osnovy kriogeneza litosfery* [Foundations of Cryogenesis of Lithosphere]. Moscow, Izd-vo MGU, 1993, 336 p. (in Russian).
- Rybalchenko V.V., Trusov A.I., Buddo I.V. et al. A complex of auxiliary studies at the stages of exploration and development of oil and gas fields: from mapping permafrost to prospecting for groundwater to ensure drilling and operation. *Gazovaya promyshlennost’* [Gas Industry], 2020, No. 11/808, p. 20–28 (in Russian).

- Stognij V.V. Impul'snaya induktivnaya elektrorazvedka talikov kriolitozony Central'noj Yakutii [Pulsed inductive electrical exploration permafrost taliks in Central Yakutia]. Yakutsk, Izd-vo SO RAN, 2003, 124 p. (in Russian).
- Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods for Solving Ill-Posed Problems]. Moscow, Nauka, 1986, 286 p. (in Russian).
- Sharlov M.V., Agafonov Yu.A., Stefanenko S.M. The modern telemetric electric exploration stations "SGS-TEM" and "Fast-Snap". Efficiency and experience of use. Pribory i sistemy razvedochnoj geofiziki [Instruments and systems of exploration geophysics], 2010, No. 01 (31), p. 20–24 (in Russian).
- Shpolyanskaya N.A. Merzlaya zona litosfery Zapadnoy Sibiri i tendentsii ee razvitiya [Frozen zone of lithosphere of Western Siberia and tendency of its development]. Moscow, Moscow University Press, 1981, 167 p. (in Russian).
- Chersky N.V., Tsarev V.P. Prospects for the development of gas hydrate deposits. Issledovaniya i rekomendacii po usovershenstvovaniyu dobychi poleznykh iskopaemykh v severnykh i vostochnykh regionah SSSR [Research and recommendations for improving mining in the northern and eastern regions of the USSR]. Yakutsk, Publishing House of YaF SO AN USSR, 1973, pt 1, 121 p. (in Russian).
- Chuvilin E.M., Davletshina D.A., Lupachik M.V. Hydrate formation in frozen and thawing methane-saturated sediments. Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 2, p. 44–52.
- Chuvilin E.M., Perlova E.V., Baranov Yu.B. et al. Stroenie i svoystva porod kriolitozony yuzhnoj chasti Bovanenkovskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya [Structure and properties of rocks in the cryolithozone of the southern part the Bovanenkovskoye gas condensate offshore]. Moscow, GEOS, 2007, 135 p. (in Russian).
- Yakushev V.S. Prirodnyy gaz i gazovyye gidraty v kriolitozone [Natural Gas and Gas Hydrates in the Cryolithozone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (in Russian).
- Yakushev V.S., Perlova E.V., Mahonina N.A. et al. Gas hydrates in sediments of continents and Islands. Rossijskij khimicheskij zhurnal [Russian Chemical Journal], 2003, vol. XLVII, No. 3, p. 80–90 (in Russian).
- Aregbe A.G. Gas hydrate – properties, formation and benefit. Open J. Yangtze Oil and Gas, 2017, vol. 02, No. 01, p. 27–44.
- Buddo I.V., Misyurkeeva N.V., Shelohov I.A. et al. Experience of 3D transient electromagnetics application for shallow and hydrocarbon exploration within Western Siberia. In: Proc. of the 79th EAGE Conference & Exhibition 2017 (Paris, France, June 12–15, 2017). Paris, 2017, DOI: 10.3997/2214-4609.201700667.
- Chuvilin E., Bukhanov B., Davletshina D. et al. Dissociation and self-preservation of gas hydrates in permafrost. Geosciences, 2018, vol. 8, p. 431, DOI: 10.3390/geosciences8120431.
- Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. Gas and gas hydrates in the permafrost of Bovanenkov gas field, Yamal Peninsula, West Siberia. Polarforschung, 2000, vol. 68, p. 215–219.
- Dolgikh Y., Sanin S., Buddo I. et al. Improving the efficiency of geophysical research based on the integration of seismic and modern electrical exploration. In: Proc. of the Conference Proceedings. Tyumen, 2019, vol. 2019, p. 1–5. – <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900577>
- Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Shelohov I.A. et al. New data on fluid dynamic processes in the Arctic Zone of Western Siberia based on the results of TEM, STEM electromagnetic studies and seismic CDP studies. In: Proc. of the Conference Proceedings. Tyumen, 2019, vol. 2019, p. 1–6. – <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900574>
- Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Smirnov A.S. et al. Shallow transient electromagnetic method application to study the Yamal Peninsula permafrost zone. In: Conf. Proc. of the Geomodel 2020, Gelendzhik, Russia, Sept. 2020, vol. 2020, p. 1–6. – <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202050105>
- Sharlov M.V., Buddo I.V., Misyurkeeva N.V. et al. Transient electromagnetic surveys for high resolution near-surface exploration: basics and case studies. First Break, 2017, vol. 35 (9), p. 63–71.
- Shelokhov I.A., Buddo I.V., Smirnov A.S. et al. Inversion of TEM responses to create a near surface velocity structure. First Break, 2018, vol. 36 (10), p. 47–51. – <https://doi.org/10.3997/1365-2397.n0125>
- Uchida T., Dallimore S., Mikati J. Occurrences of natural gas hydrates beneath permafrost zone in Mackenzie delta: visual and X-ray imaginary. Ann. of the New York Academy of Sciences, 2000, vol. 912, p. 1021–1033.
- Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Natural gas and hydrate accumulation within permafrost in Russia. Cold Reg. Sci. Technol., 2000, vol. 31, p. 189–197.

*Поступила в редакцию 16 сентября 2019 г.,
после доработки – 17 декабря 2021 г.,
принята к публикации 28 февраля 2022 г.*