

ИЗУЧЕНИЕ КРИОЛИТОЗОНЫ СЕВЕРНОГО ОБРАМЛЕНИЯ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО ДАННЫМ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Д.В. Яковлев¹, А.Г. Яковлев^{1,2}, О.А. Валясина²

¹ ООО «Северо-Запад», 108811, Москва, пос. Московский, Бизнес центр «Румянцево», корпус «А», Россия; nv.yakovlev@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

Представлены результаты исследования криолитозоны в пределах северного обрамления Сибирской платформы, полученные в ходе региональных электроразведочных работ методами магнитотеллурического зондирования и зондирования становлением поля. Работы выполнялись с целью изучения всего осадочного чехла для выявления нефтегазоперспективных зон. С 2005 по 2016 г. было выполнено более 30 000 зондирований по профилям общей протяженностью около 20 000 км. Большой объем фактического материала в Енисей-Хатангском и Анабаро-Ленском прогибах позволил построить карту глубины залегания подошвы слоя многолетнемерзлых пород и понять некоторые особенности строения криолитозоны. Получена информация о распространении мерзлых пород под акваторией Хатангского залива. Над месторождениями углеводородов под толщей многолетнемерзлых пород обнаружены аномалии повышенного электрического сопротивления, которые могут быть связаны со скоплениями газогидратов.

Электроразведка, магнитотеллурические зондирования, зондирования становлением поля в ближней зоне, многолетнемерзлые породы, криолитозона, газогидраты, Енисей-Хатангский прогиб, Анабаро-Ленский прогиб

PERMAFROST STUDY IN THE NORTHERN MARGIN OF THE SIBERIAN PLATFORM BASED ON REGIONAL GEOELECTRIC SURVEY DATA

D.V. Yakovlev¹, A.G. Yakovlev^{1,2}, O.A. Valyasina²

¹ Nord-West Ltd., корпус А, Бизнес центр «Румянцево», пос. Московский, Москва, 108811, Россия; nv.yakovlev@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

The article presents results of permafrost study within northern margins of the Siberian Platform, obtained during regional geoelectric surveys by magnetotelluric and transient electromagnetic methods. The surveys aimed to identify areas perspective for oil and gas within the entire sedimentary cover. From 2005 to 2016, more than 30,000 soundings were performed with a total survey line length of more than 20,000 km. A large amount of factual data acquired in the Yenisei-Khatanga and the Anabar-Lena regional troughs allowed mapping the depth of permafrost base and provided insights about other structural features of the permafrost interval, along with the information on permafrost distribution beneath the Khatanga bay. High-resistivity anomalies identified over hydrocarbon reservoirs capped by the permafrost strata can be associated with accumulations of gas-hydrates.

Electromagnetic, magnetotelluric soundings, transient electromagnetics, permafrost, cryolithozone, gas hydrates, Yenisei-Khatanga trough, Anabar-Lena trough

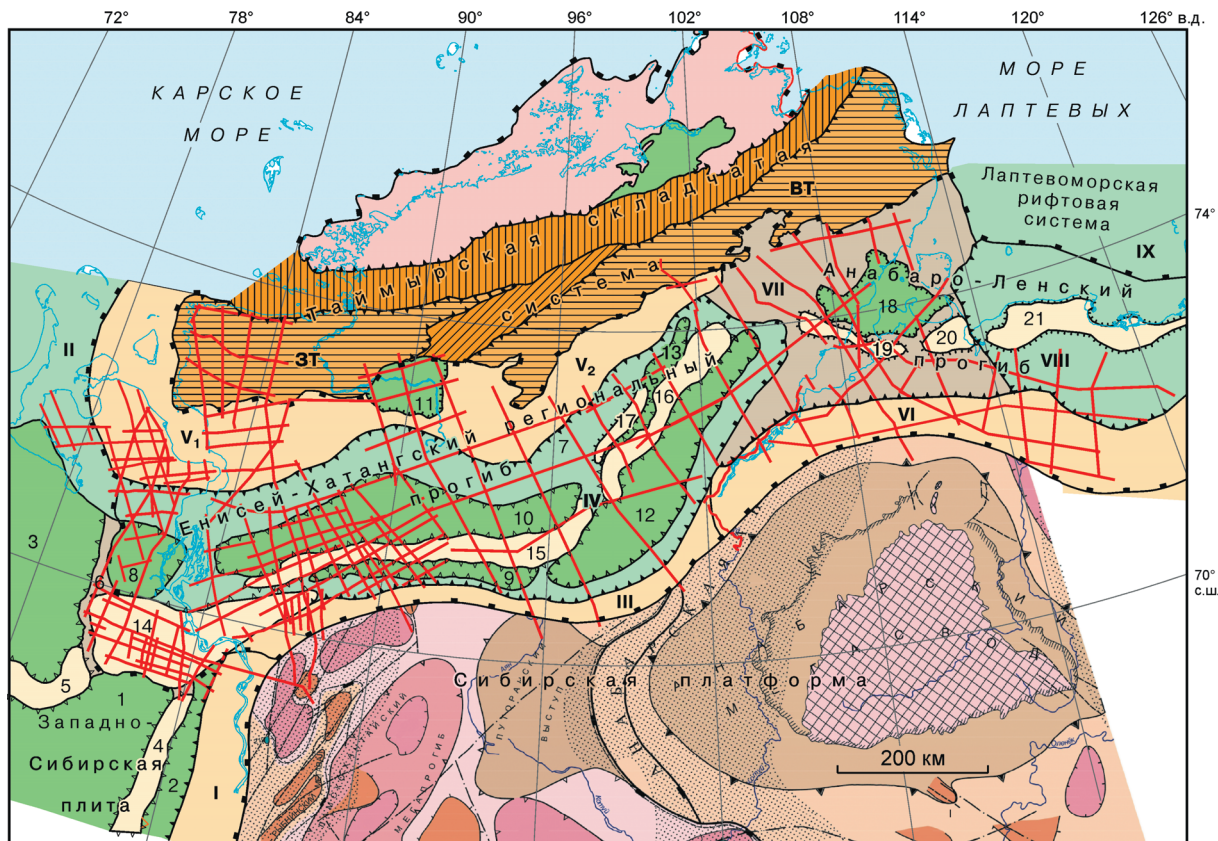
ВВЕДЕНИЕ

Электроразведка является эффективным методом изучения многолетнемерзлых пород (ММП) [Зыков, 1999; Якунов, 2008]. Это обусловлено тем, что проводимость осадочных пород определяется в основном наличием воды в поровом пространстве, а замерзание этой воды приводит к многократному повышению удельного электрического сопротивления (УЭС) пород [Огильви, 1990].

Традиционно для изучения ММП используется целый ряд электроразведочных методов: разные модификации электроразведки на постоянном токе и методы электроразведки на переменном токе – зондирование становлением поля в

ближней зоне (ЗСБ) и частотные зондирования. При этом магнитотеллурические зондирования (МТЗ) обычно применяются для решения более глубоких задач. Возможность изучения ММП с помощью МТЗ была известна уже с 70-х гг. прошлого века [Koziar, Strangway, 1975], главным образом в высокочастотном варианте [Koziar, Strangway, 1978].

С 2004 г. в пределах северного обрамления Сибирской платформы проводятся масштабные региональные геофизические исследования с целью выявления новых зон нефтегазоаккумуляции. Район исследований включает территорию Гыданского и Таймырского полуостровов, междуречья



Границы тектонических элементов:

- | | | | | | |
|--|-----------------|--|------------|--|-----------------|
| | надпорядковых | | I порядка | | Береговая линия |
| | суперпорядковых | | II порядка | | Профили МТЗ |

Таймырской складчатой системы:

- палеозойские впадины:
ЗТ – Западно-Таймырская
ВТ – Восточно-Таймырская
- Тарейский вал
- Пограничная флексура
- Полуграбен Шренк
- Северо-Таймырский щит

Западно-Сибирской плиты:

- Суперпорядковые элементы:
- I** – Пакулихинская моноклиза
 - II** – Ямало-Гыданская переходная зона
- I порядка:
- Отрицательные:
1. Пендомаянская впадина
 2. Долганский прогиб
 3. Ямало-Гыданская синеклиза
- Положительные:
4. Сузунско-Ванкорский вал
 5. Мессояхский мегавал
 6. Гыданская седловина

Структурно-тектонические элементы

По мезозойским отложениям:

- положительные
- II** отрицательные суперпорядковые
- отрицательные I и II порядков
- VI** моноклизы и выступы
- VII** седловины

Енисей-Хатангского регионального прогиба:

- Суперпорядковые элементы:
- III** – Северо-Сибирская моноклиза
 - IV** – Центрально-Таймырский желоб
 - V** – Таймырская моноклиза
 - V₁** – Южно-Таймырская моноклиза
 - V₂** – Янгодо-Горбитский выступ
- I и II порядка:
- Отрицательные:
7. Гыдано-Хатангская переходная зона
 8. Носковский прогиб
 9. Дудыптинский мегапрогиб
 10. Агапский мегапрогиб
 11. Пясинский полуграбен
 12. Боганидско-Жданихинский мегапрогиб
 13. Турку-Логатский прогиб
- Положительные:
14. Танамско-Малохетский мегавал
 15. Рассохинский мегавал
 16. Балахинский мегавал
 17. Кубалахский мегавал

Сибирской платформы:

- положительные
- отрицательные
- Основные региональные разломы
- Зоны интенсивного рифейского прогибания

Анабаро-Ленского прогиба:

- Суперпорядковые элементы:
- VI** – Анабарская моноклиза
 - VII** – Анабаро-Хатангская седловина
 - VIII** – Лено-Анабарская впадина
- I и II порядка:
- Отрицательные:
18. Харатумусская впадина
- Положительные:
19. Сопочная зона поднятий
 20. Нордвикский вал
 21. Тигяно-Анабарская зона поднятий

Лаптевоморской рифтовой системы:

- Суперпорядковые элементы:
- IX** – Юго-Западно-Лаптевоморская впадина

Рис. 1. Положение профилей магнитотеллурических зондирований на структурно-тектонической карте северного обрамления Сибирской платформы [Афанасенков и др., 2018].

Хатанги и Лены. Основными элементами тектонического строения данного района являются Таймырская складчатая система, Енисей-Хатангский региональный прогиб (ЕХРП) и Анабаро-Ленский прогиб (АЛП) (рис. 1).

Основу геофизического комплекса составляют сейсморазведка (метод общей глубинной точки) и электроразведка методом МТЗ. Магнитотеллурические зондирования направлены на изучение особенностей состава и строения юрско-меловых толщ и палеозойских комплексов [Афанасенков, Яковлев, 2018]. В то же время полученные результаты по региональной сети профилей показывают, что метод МТЗ в современном виде также позволяет изучать строение криолитозоны: определять мощность толщ пород в мерзлом состоянии, выявлять неоднородность их строения, обнаруживать подмерзлотные аномалии, которые могут быть связаны с углеводородами (УВ).

Считаем необходимым напомнить значение геокриологических терминов, используемых в статье. Мерзлые породы (или многолетнемерзлые породы) – это имеющие отрицательную температуру горные породы, в которых хотя бы часть поровой влаги превращена в лед. Породы с отрицательной температурой, в которых поровая влага не замерзла, называют “талыми” или “охлажденными”. Криолитозона – это “зона существования горных пород с отрицательной температурой, часть которых при достаточной минерализации поровых растворов может находиться в талом состоянии, а при дальнейшем понижении температуры, вследствие тех или иных процессов, снова промерзает” [Якупов, 2008]. Поскольку сопротивление пород резко возрастает при переходе воды из жидкого состояния в твердое, с помощью электроразведки ярко выделяются породы в мерзлом состоянии на фоне талых, или охлажденных, пород. В то же время часть пород в криолитозоне, которая находится в талом или охлажденном состоянии, по электрическому сопротивлению может не отличаться от пород, залегающих ниже криолитозоны.

На практике, для инженерно-геологических задач, а также для учета влияния верхней части разреза на результаты сейсморазведки, информация о строении именно толщи мерзлых пород представляет наибольший интерес.

МЕТОДИКА ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Метод МТЗ относится к методам электроразведки на переменном токе и основан на изучении естественного электромагнитного поля Земли [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Магнитотеллурические зондирования выполнялись с помощью современной канадской аппаратуры фирмы Phoenix Geophysics Ltd в широком частотном диапазоне – от 0.0003 до 300 Гц. Измерения электриче-

ских компонентов поля производились с помощью заземленных электрических диполей, магнитных – с помощью индукционных датчиков. В первые годы (с 2004 по 2009 г.) региональные работы выполнялись с шагом 2–3 км по профилю, затем с шагом 1 км, а на Новотаймырской площади в 2014–2015 гг. была проведена съемка с шагом 500 м.

Помимо МТЗ другим электроразведочным методом, позволяющим эффективно изучать криолитозону на всю глубину ее распространения, является метод зондирования становлением поля в ближней зоне. Метод ЗСБ основан на изучении поля переходных процессов, протекающих в земле при выключении тока в источнике [Хмелевской, Костицын, 2010]. При наземных работах в качестве источника и приемника чаще всего используют петли, при морских исследованиях – электрические диполи. Использование для возбуждения и приема сигнала незаземленных петель в методе ЗСБ дает ряд преимуществ: существенно упрощает методику полевых работ в зимних условиях и позволяет избежать искажений из-за приповерхностных неоднородностей. В то же время необходимо отметить проблему с проявлением на кривых ЗСБ вызванной поляризации в мерзлых породах (“быстрая” вызванная поляризация, или эффект Максвелла–Вагнера) [Агеев, Агеев, 2017]. Для борьбы с этим эффектом необходимо усложнять методику полевых работ, использовать различные измерительные и генераторные петли.

В районе исследований для решения геологических задач требовалась глубинность, не доступная методу ЗСБ, поэтому в качестве основного применялся метод МТЗ. При этом данные о строении криолитозоны получены при проведении региональных МТЗ в качестве дополнительной информации. Таким образом, все результаты и выводы, представленные в статье, базируются на данных МТЗ, но могут быть получены и по результатам ЗСБ [Ним и др., 1994; Баранов и др., 2014].

В 2014–2015 гг. работы МТЗ на некоторых региональных профилях сопровождались работами ЗСБ, и есть возможность сопоставить результаты двух электроразведочных методов. На этих профилях ЗСБ проводилось с целью подавления влияния приповерхностных неоднородностей на данные МТЗ. Такой вариант комплексирования ЗСБ с МТЗ широко применяется в мировой практике [Sternberg et al., 1988]. На рис. 2 представлены геоэлектрические разрезы, полученные с помощью ЗСБ и МТЗ по одному из профилей. Разрезы построены независимо по каждому методу на основе результатов автоматической (оккамовской) одномерной инверсии данных [Constable et al., 1987]. Из сопоставления этих разрезов можно сделать вывод, что результаты, полученные двумя

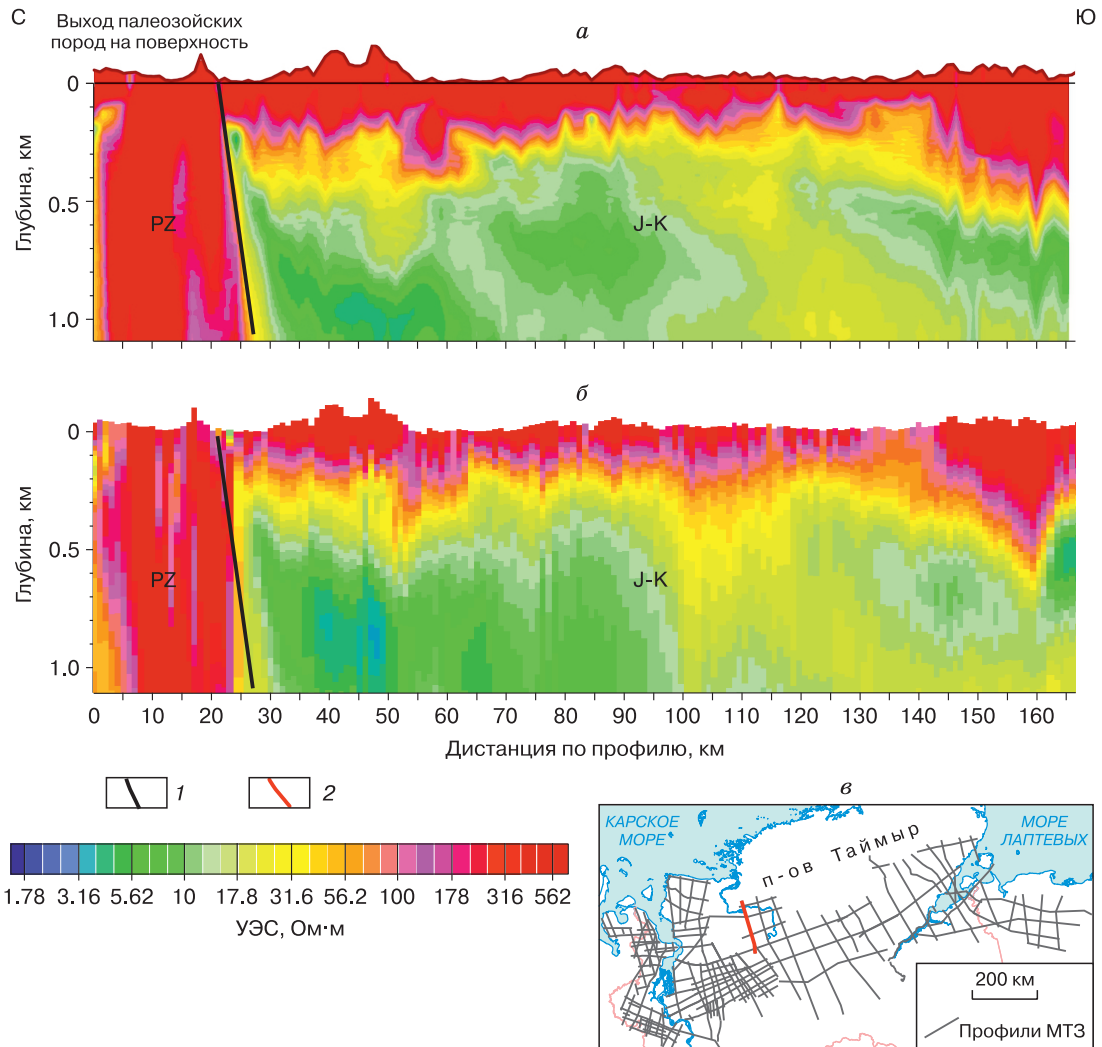


Рис. 2. Сопоставление геоэлектрических разрезов, построенных по одному и тому же профилю по данным ЗСБ (а) и МТЗ (б) и схема региональных электроразведочных профилей района исследований (в). Геологические комплексы: PZ – палеозойский, J–К – юрско-меловой. Шаг по профилю: а – 500 м; б – 1000 м. 1 – тектоническая граница между геологическими комплексами, выделенная по электроразведочным данным; 2 – положение профиля на схеме.

различными методами, совпадают, локальные аномалии выделяются одинаково, региональная составляющая идентична.

Геоэлектрическая характеристика верхней части разреза

Большая часть мезо-кайнозойских пород ЕХРП и АЛП представлена песками, песчаниками, аргиллитами и алевролитами, которые слагают пологозалегающую сероцветную терригенную толщу. Мощность этой толщи меняется от 10–12 км в осевых частях прогибов до нуля на бортах [Афанасенков и др., 2018].

Результаты электроразведочных работ.

По результатам электроразведочных работ удель-

ное сопротивление терригенных юрско-меловых пород в нормальной обстановке в среднем составляет 7–30 Ом·м. Относительно низкие сопротивления в этом интервале разреза обусловлены содержащейся в терригенных породах водой при их высокой эффективной пористости.

На всех геоэлектрических разрезах в районе исследований верхние несколько сотен метров имеют высокое сопротивление – от 100 до 500 Ом·м (см. рис. 2). Мощность этого высокоомного слоя весьма неоднородна и меняется от 0 до 600 м, а местами до 1100 м. Там, где на поверхность выходят мезо-кайнозойские породы, этот слой отвечает породам в мерзлом состоянии. Палеозойские породы и пермо-триасовые траппы

сами по себе имеют высокое электрическое сопротивление (см. рис. 2). Поэтому выделить в них мерзлые породы по сопротивлению сложно.

Отметим, что при определении УЭС методами электроразведки на постоянном токе для мерзлых пород характерны значения в несколько тысяч омметров. При использовании индукционных методов электроразведки, к которым относятся МТЗ и ЗСБ, получаемые значения УЭС мерзлых пород будут в несколько раз ниже. Объяснить такую разницу можно эффектом анизотропии [Электроразведка..., 2005, с. 59–61]. Для слоев-изоляторов, представляющих собой субгоризонтальное чередование пластов разного сопротивления, УЭС для индукционных методов будет определяться главным образом продольной проводимостью более низкоомных пластов, а для методов на постоянном токе (гальванических) – поперечным сопротивлением более высокоомных пластов.

Сопоставление результатов электроразведки с каротажем скважин. На рис. 3 приведен характерный геоэлектрический разрез по данным МТЗ до глубины 2 км по профилю субширотного

простираения в Приенисейской части ЕХРП. Разрез построен по результатам простой автоматической одномерной инверсии эффективных кривых МТЗ $Z_{\text{eff}} = (Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx})^{1/2}$ [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Мощность высокоомного слоя, предположительно отвечающего мерзлым породам, на этом профиле меняется существенно: с 50 м в районе р. Енисей до 450 м на востоке профиля с локальной аномалией мощности до 700 м в районе Рассохинского мегавала. Сопротивления по данным МТЗ и по электрическому каротажу в скважинах хорошо согласуются. Такое согласование наблюдается не только на этом профиле, но и во всем районе исследований (рис. 4). Электрическое сопротивление мерзлых пород по каротажу меняется от 100 до 1000 Ом·м.

По результатам измерений температуры в скважинах мощность криолитозоны в данном районе в среднем составляет 450–550 м. Заметим, что термометрию зачастую проводят в неустоявшихся скважинах (скв. 1, 4, 5 на рис. 4). В таких случаях получить абсолютные значения температур крайне сложно. Поэтому, если на температурной кривой нет перехода через нуль, криолитозону в та-

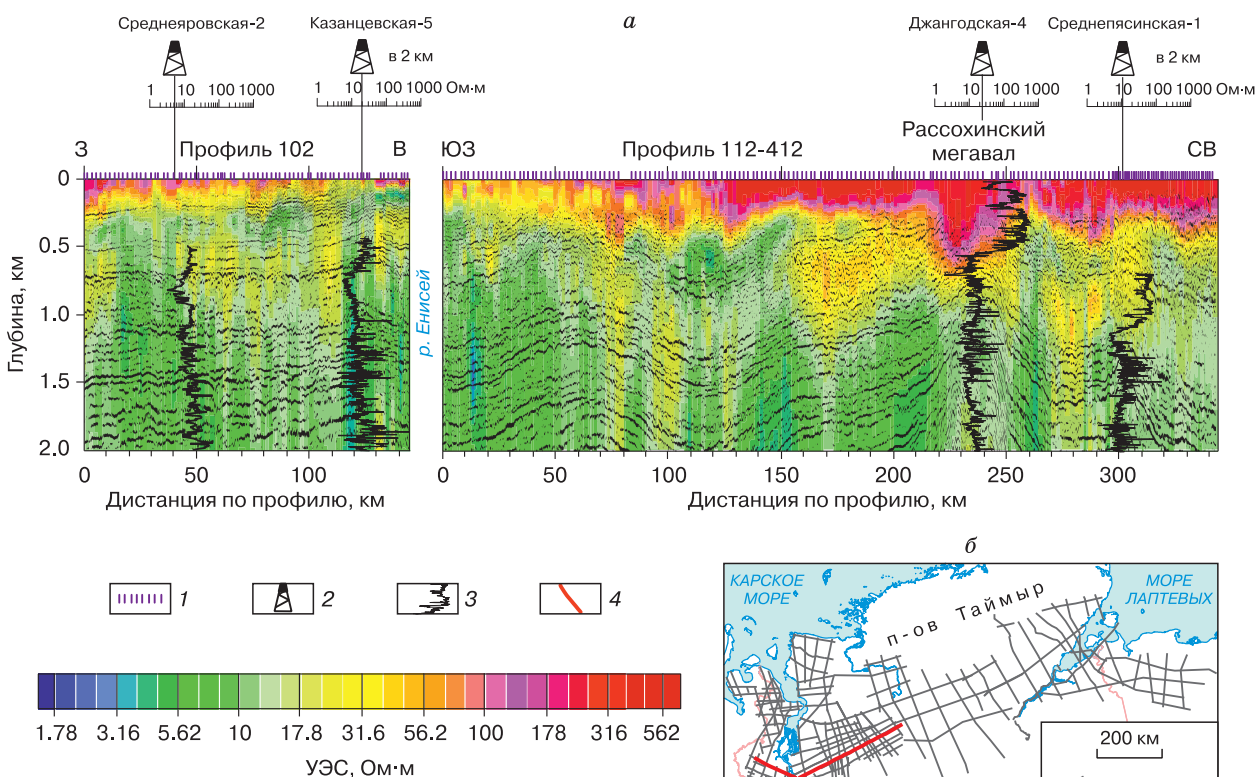


Рис. 3. Характерный геоэлектрический разрез до глубины 2 км по данным МТЗ в западной части Енисей-Хатангского регионального прогиба (а) и схема региональных электроразведочных профилей района исследований (б).

1 – пункты МТЗ; 2 – скважины глубокого бурения; 3 – диаграммы каротажа сопротивления в скважинах; 4 – положение профиля на схеме.

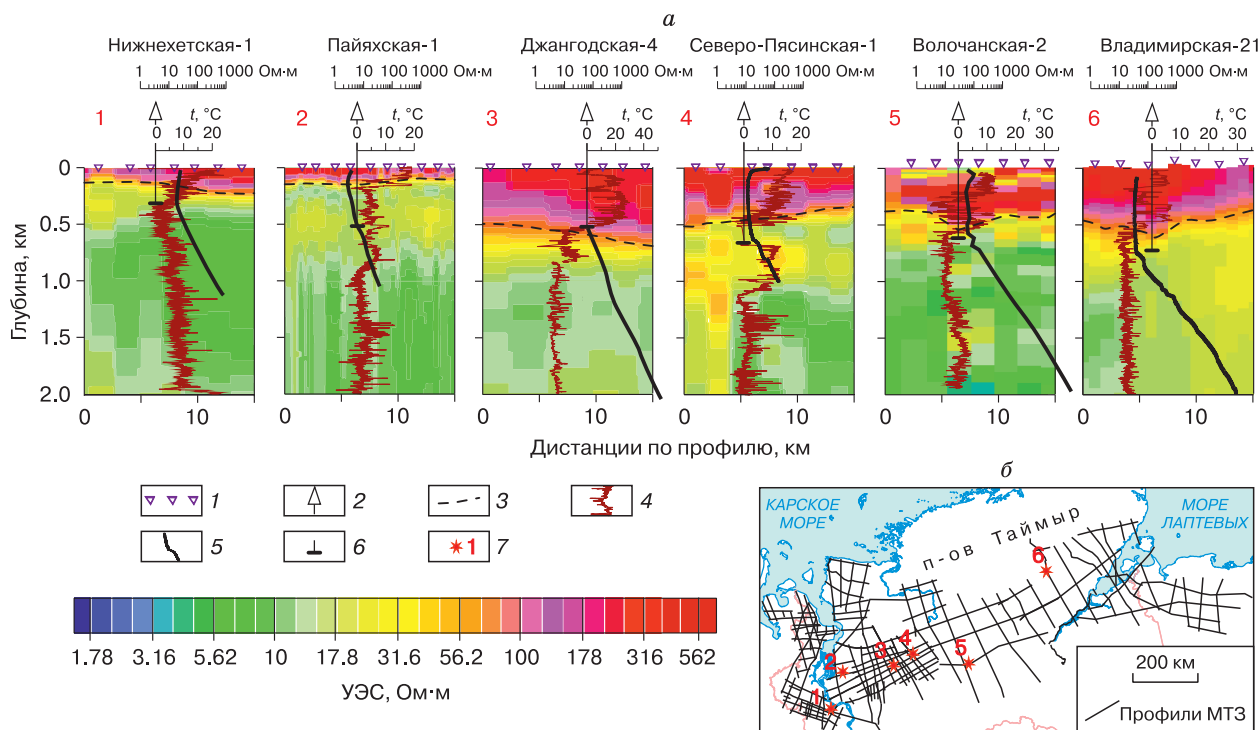


Рис. 4. Сопоставление геоэлектрических разрезов со скважинными данными (а) и схема региональных электроразведочных профилей района исследований (б).

1 – пункты МТЗ; 2 – положение скважин на профиле; 3 – положение подошвы мерзлых пород по данным МТЗ; 4 – диаграммы каротажа сопротивления в скважинах; 5 – кривая термометрии; 6 – подошва криолитозоны по термометрии; 7 – положение и номер скважины на схеме.

ких скважинах выделяют по участку температурной кривой с нулевым или слабым градиентом, а подошву криолитозоны – по переходу от нулевого или слабого градиента к нормальному геотермическому градиенту $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 100 м (см. рис. 4). Такой способ определения снижает достоверность получаемых значений.

Мощность ММП, определяемая по результатам электроразведочных работ, и глубина распространения криолитозоны близки на востоке разреза, представленного на рис. 3, и существенно отличаются на западе. Это связано с тем, что на западе в нижней части криолитозоны залегают охлажденные породы. Причиной того, что поровая влага в породах, находящихся в криолитозоне, не замерзла, может быть, например, повышенная минерализация поровых растворов или преобладание глинистых пород в разрезе. Рассмотрим отдельно каждую из этих причин.

Минерализация поровых растворов. Данные о минерализации поровых растворов немного. Из имеющихся данных (рис. 5) следует, что практически повсеместно в верхней части разреза минерализация воды относительно низкая, в среднем $6\text{--}8\text{ г/л}$, что существенно ниже минерализации морской воды $30\text{--}35\text{ г/л}$, замерзающей при $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$

и ниже. По некоторым скважинам имеются повышенные значения минерализации (до 22 г/л), связанные, по-видимому, с вытеснением солей под слой мерзлых пород в процессе кристаллизации воды [Романовский, 1983]. Такие зоны повышенной минерализации поровых растворов на геоэлектрических разрезах, вероятно, проявляются локальными участками очень низкого сопротивления под слоем высокоомных мерзлых пород, как, например, к западу от Енисея на глубине $150\text{--}200\text{ м}$ (см. рис. 3). Но это отдельные локальные участки. В целом же повсеместно слабосолоноватые поровые растворы не позволяют увязать наблюдаемые по электроразведке региональные изменения мощности ММП с изменением минерализации поровой влаги в породах.

Отметим, что относительно низкая минерализация поровых растворов позволяет, согласно расчетам А.А. Рыжова, в песчано-глинистых юрско-меловых отложениях разделить по сопротивлению существенно глинистые и преимущественно песчаные слои [Рыжов, Судоплатов, 1990]. При минерализации менее $10\text{--}15\text{ г/л}$ при прочих равных условиях глины имеют более низкое сопротивление, чем пески и песчаники. Эта особенность используется для построения литологических раз-

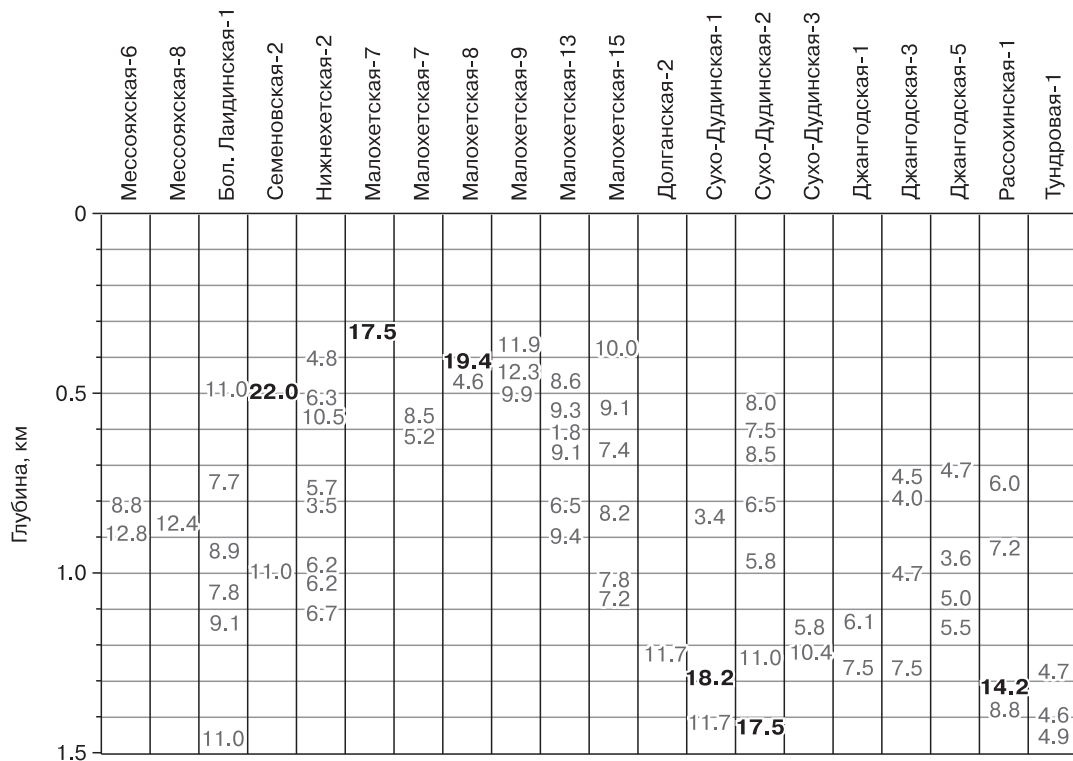


Рис. 5. Значения минерализации поровых растворов в районе исследований по результатам опробования в скважинах.

Выделены жирным шрифтом значения более 14 г/л, остальные – менее 14 г/л.

резов юрско-мелового комплекса ЕХРП по электроразведочным данным [Афанасенков, Яковлев, 2018].

Глинистые породы в криолитозоне. Широкое развитие в криолитозоне охлажденных пород может объясняться преобладанием в разрезе глинистых отложений. В глинах содержится большой объем связанной воды, замерзающей при более низкой температуре, чем свободная. Как следствие, при прочих равных условиях сопротивление песчаных пород при переходе температуры через “точку замерзания раствора” меняется скачкообразно, а глинистых пород – плавно и при более низких температурах (рис. 6) [Огильви, 1990]. Кроме того, контраст сопротивления песков (ρ_s) и глин (ρ_c) существенно увеличивается при переходе из охлажденного состояния в мерзлое (см. рис. 6). Отметим, что представленные на рис. 6 зависимости отражают УЭС пород в процессе промерзания или при стабильных значениях температуры. Изменение электрического сопротивления пород в процессе оттаивания происходит с “запаздыванием”, образуя подобие петли гистерезиса. Тем не менее соотношение УЭС для песчаных и глинистых пород сохраняется. Эти закономерности изменения электрического сопротивления пород при отрицательных температурах позволяют

объяснить особенности строения толщи ММП, наблюдаемые по электроразведочным данным в районе исследований.

Именно высокой глинистостью пород в криолитозоне объясняется существенная разница мощности слоя мерзлых пород и криолитозоны на западе района исследований в Приенисейской полосе ЕХРП. Так, на Пайяхском месторождении мощность криолитозоны по результатам термометрии в скважинах составляет около 500 м. В то же время каротаж сопротивлений и результаты МТЗ показывают, что непосредственно в мерзлом состоянии находятся породы в верхних

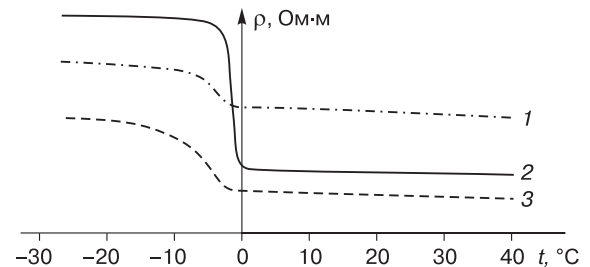


Рис. 6. Вид зависимости удельного сопротивления (ρ) водонасыщенных пород от температуры [Огильви, 1990].

1 – скальные породы (ρ_r); 2 – пески (ρ_s); 3 – глины (ρ_c).

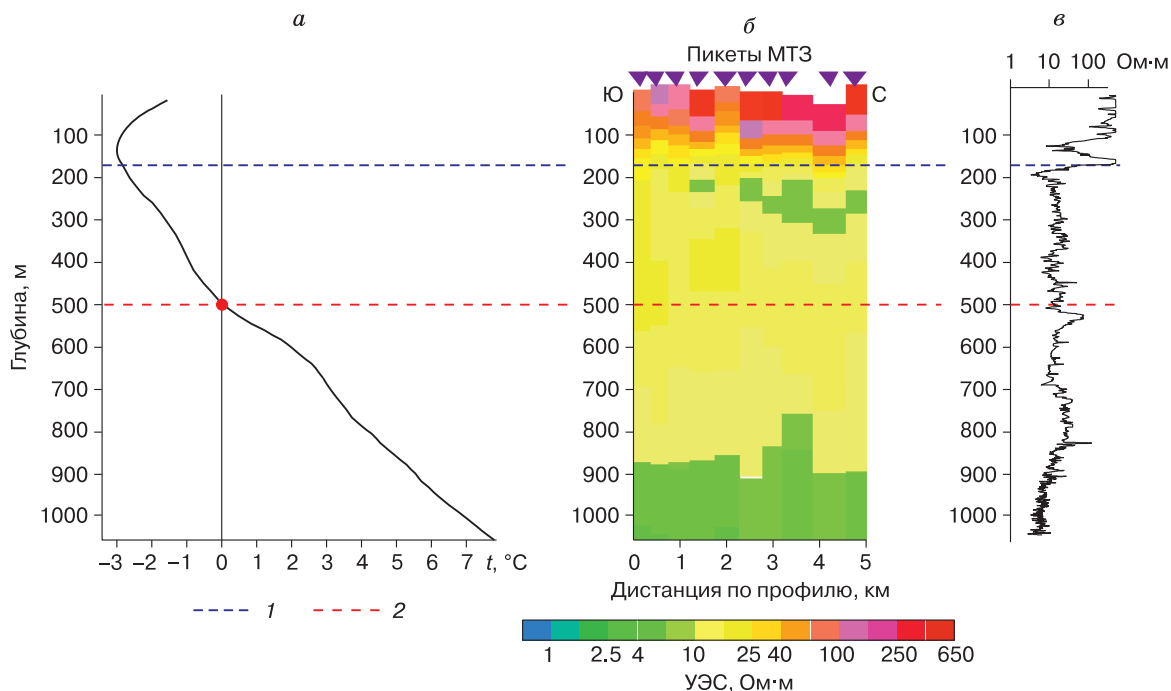


Рис. 7. Положение подошвы мерзлых пород (1) и криолитозоны (2) в районе Пайяхских скважин, расположенных на западе района исследований.

a – температурная кривая в скважине Пайяхская-1; *б* – фрагмент геоэлектрического разреза по профилю 501 Новотаймырской площади; *в* – электрический каротаж (КС) в скважине Пайяхская-1. Положение подошвы определено по КС (1) и $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2).

200 метрах разреза, где сопротивление превышает 30 Ом·м (рис. 7). Из результатов бурения известно, что глубже 200 м породы существенно глинистые.

Зависимость мощности слоя высокого сопротивления, который связан с породами в мерзлом состоянии, от состава этих пород можно отметить, если наложить сейсмические разрезы на геоэлектрические. На рис. 8, *a*, *б* приведен пример такого сопоставления и принципиальная литолого-геофизическая модель. Видно, что положение локальных участков увеличения мощности толщи ММП в центре разреза, над Рассохинским мегавалом, и на юге, на склоне Дудыптинского мегапрогиба, согласуется с приближением к поверхности слоя, выделенного на сейсмическом разрезе. Ниже подошвы криолитозоны в этом слое отмечается повышенное сопротивление (17–30 Ом·м), что говорит о преобладании в нем песчаников. Этот вывод сделан на основе результатов обобщения данных по скважинам [Афанасенков, Яковлев, 2018] и согласуется с теоретическими представлениями о сопротивлении песчано-глинистых пород с минерализацией поровых растворов менее 12 г/л [Рыжов, Судоплатов, 1990]. Выше слоя песчаников залегает слой, сложенный, судя по пониженным значениям УЭС, преимущественно глинами. Поэтому породы данного слоя сохраняют связанную

воду, незамерзающую вплоть до температуры $-2...-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Попадая в более низкие температуры на глубинах 0–200 м, глинистый слой все же замерзает, но имеет сопротивление ниже, чем песчаный слой, равное 100–200 Ом·м [Osterkamp, 2001] на фоне 300–500 Ом·м. Аналогичные локальные участки увеличения мощности ММП отмечаются и на разрезе по линии 2 (см. рис. 8, *в*). На разрезе по линии 3 (см. рис. 8, *г*) особенности геоэлектрического разреза толщи ММП также можно объяснить структурно-литологическим строением.

Особенности строения толщи многолетне-мерзлых пород. В районе исследований имеются обширные зоны существенного увеличения мощности ММП, связанные, вероятно, с составом пород. Одна такая зона расположена на востоке ЕХРП, к северу от р. Хатанга. Разрез по линии 4, пересекающий эту зону, приведен на рис. 8, *д*. Видимому, здесь верхнюю часть разреза слагают мощные песчаные слои, промерзающие на глубину до 1 км. Нижняя граница высокоомного слоя “размыта”, нет резкого перехода к подстилающим проводящим породам, отмечаемого в других местах. Можно было бы предположить, что породы этого песчаного слоя в талом состоянии имеют высокие сопротивления. Но на северном и южном окончании данного слоя наблюдается значительное уменьшение его сопротивления под слоем

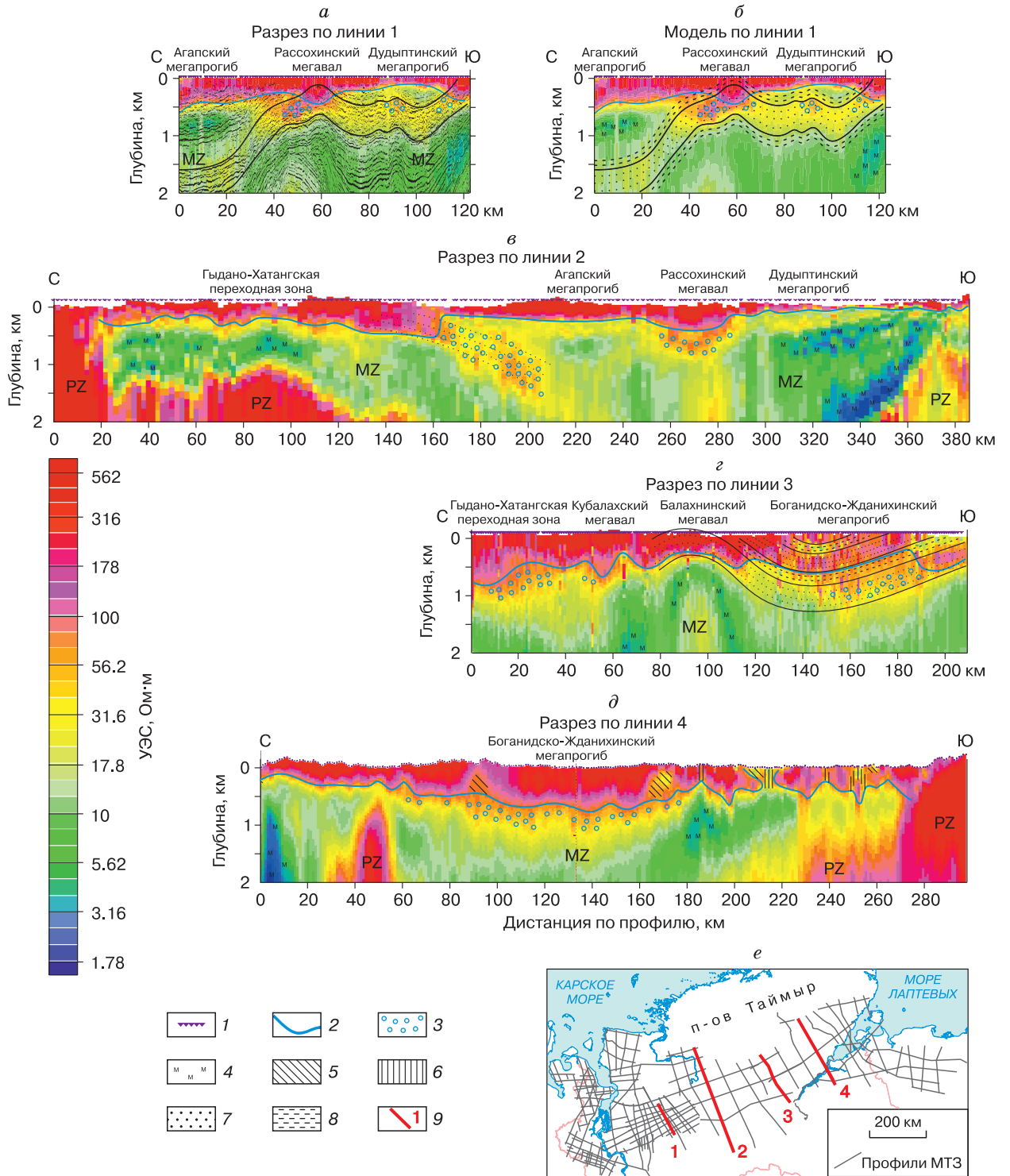


Рис. 8. Геолого-геофизические разрезы субмеридионального направления до глубины 2 км.

а – совмещенные геоэлектрический и сейсмические разрезы по линии 1; б – геологическая модель по линии 1; в–д – геолого-геофизические разрезы по линиям 2–4 соответственно; е – схема региональных электроразведочных профилей района исследований. Геологические комплексы: PZ – палеозойский, MZ – мезозойский. 1 – пункты МТЗ; 2 – граница ММП; 3 – подмерзлотные аномалии повышенного сопротивления; 4 – зоны пониженного сопротивления под толщей ММП; 5 – зоны частичного протаивания; 6 – зоны сплошного протаивания; 7 – песчаные породы; 8 – глинистые породы; 9 – положение и номер линии разрезов на схеме.

мерзлых пород. Возможно, повышение сопротивления в песчаном слое-коллекторе под слоем ММП связано со скоплением газа или газогидратов. В данном случае ММП выступают покровы. (Подробнее об этом см. ниже.)

К особенностям строения толщи ММП, выявленным в ходе региональных электроразведочных работ, относятся также проводящие зоны различного типа. На рис. 9 приведены два примера наличия под мерзлыми породами слоев с очень низ-

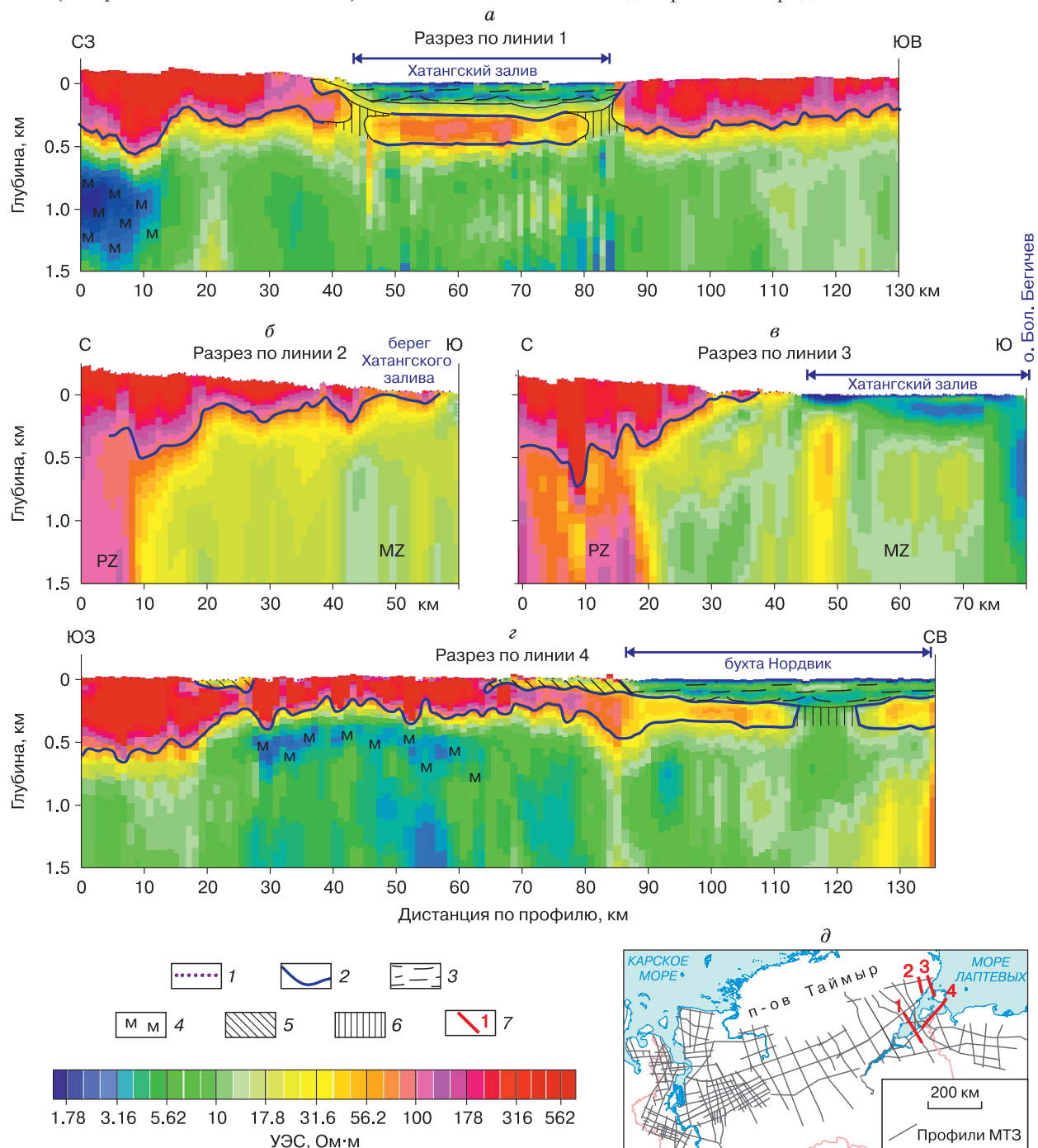


Рис. 9. Геоэлектрические разрезы верхних 1.5 км по профилям в районе Хатангского залива (на акваториях магнитотеллурические зондирования проводились со льда).

a-г – геолого-геофизические разрезы по линиям 1–4 соответственно; *д* – схема региональных электроразведочных профилей района исследований. Геологические комплексы: PZ – палеозойский, MZ – мезозойский. 1 – пункты МТЗ; 2 – граница ММП; 3 – талый слой под акваториями; 4 – зоны пониженного сопротивления под толщей ММП; 5 – зоны частичного протаивания; 6 – зоны сплошного протаивания; 7 – положение и номер линии разреза на схеме.

ким сопротивлением (до 2–3 Ом·м). Аналогичные зоны отмечаются и на разрезах на рис. 8. Вероятнее всего, низкое сопротивление вызвано повышенной минерализацией поровых растворов. Под слоем ММП повышение минерализации может быть связано с отжатием солей в нижележащие слои в процессе промерзания пород [Романовский, 1983; Ершов, 2002].

Проводящие зоны другого типа нарушают однородность слоя ММП (примеры см. на рис. 8, д, 9). Зачастую под крупными реками наблюдаются зоны сплошного протаивания. Например, под рекой Хатанга – южное окончание разреза по линии 4. Имеются также зоны частичного протаивания. На том же разрезе по линии 4 показаны локальные зоны понижения сопротивления в нижней части ММП. Такие зоны наблюдаются там, где мощность ММП более 500 м. Возможно, подобные проводящие зоны в слое ММП связаны с крупными тектоническими нарушениями и особым потоком флюидов в них – притоком с глубин подогретых водных растворов.

Все приведенные примеры показывают возможность с помощью электроразведки не только изучать региональные характеристики ММП, но и выявлять локальные неоднородности в них.

Карта глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород северного обрамления Сибирской платформы

По всем профилям, на которых с 2005 г. проводились электроразведочные работы, выделена подошва высокоомного слоя. Этот слой, как показано выше, рассматривается авторами как толща пород в мерзлом состоянии. Подошва слоя выделялась визуально на геоэлектрических разрезах. В большей части района исследований положение подошвы определяется однозначно по резкому изменению сопротивления в соседних слоях от 10–30 до 150–300 Ом·м. На некоторых участках профилей изменение сопротивления с глубиной происходит более плавно. В таких зонах подошва слоя определялась по граничным значениям УЭС 50–80 Ом·м (среднегеометрическое значение УЭС для двух слоев на подошве высокоомного слоя в случае контрастной границы). Эти значения согласованы с данными электрического каротажа в скважинах (см. рис. 4).

По этим данным построена карта глубины залегания подошвы слоя ММП (рис. 10). Там, где мерзлые породы выходят на поверхность, значения на карте совпадают с мощностью слоя ММП; там, где ММП перекрыты талым слоем (например, на акваториях), мощность ММП меньше показанной на карте глубины залегания подошвы этого слоя. В областях отсутствия ММП даны нулевые значения глубины залегания подошвы этого слоя.

Суммарная протяженность используемых профилей – более 20 000 км (около 22 000 точек МТЗ). Разумеется, сеть наблюдений неравномерная. Для запада территории она позволяет построить карту масштаба 1:200 000, на востоке – 1:500 000, в центре – 1:1 000 000. Представленная карта построена в масштабе 1:1 000 000. Несмотря на мелкий масштаб, на сегодняшний день эту карту, по мнению авторов, можно назвать наиболее достоверным и детальным источником информации о глубине залегания подошвы мерзлых пород в регионе. Она позволяет говорить о региональных закономерностях изменения мощности слоя ММП.

Точность определения мощности слоя ММП по данным МТЗ зависит от контраста его сопротивления по отношению к подстилающим породам. В большинстве случаев высокий контраст позволяет оценить точность до 5–7 % от глубины. Это значит, что при мощности 50 м погрешность составляет ±3 м, при мощности 500 м она составляет ±30 м. Шаг изолиний карты выбран исходя из этих значений.

На западе территории в районе р. Енисей при переходе к Западно-Сибирской плите мощность ММП уменьшается и составляет от 0 до 150 м. Зона пониженной мощности вытянута с севера на юг вдоль Енисея.

При продвижении на восток, в районе Дудыптинского и Агапского мегапрогибов и Рассохинского мегавала, мощность мерзлоты увеличивается. Наибольшая мощность (до 900 м) наблюдается к северу от оси Агапского мегапрогиба в междуречье Енисея и Пясины. Рассохинскому мегавалу также соответствуют повышенные значения мощности мерзлоты: здесь мощность слоя порядка 500–700 м. На южном краю рассматриваемой области отмечается локальное повышение мощности мерзлоты до 1000 м в области перехода Сибирской платформы к ЕХРП. На севере наблюдается протяженная субширотная область увеличения мощности мерзлого слоя в центральной части Южно-Таймырской моноклизы в районе Хабейских и Гольчихинской скважин. Дудыптинский мегапрогиб выделяется пониженными мощностями слоя мерзлых пород – 100–300 м.

В центральной части района исследований мощность мерзлоты уменьшается и составляет в среднем 200–400 м. Согласованность изменения мощности ММП и положения основных структурно-тектонических элементов ЕХРП сохраняется. Над переходом Дудыптинского мегапрогиба в Боганидско-Жданихинский мегапрогиб мощность мерзлоты уменьшается до 50–100 м, Гыдано-Хатангская переходная зона также отличается пониженными значениями мощности порядка 100–300 м. Зона повышенной до 400–500 м мощности ММП опоясывает Янгодо-Горбитский выступ. Ее

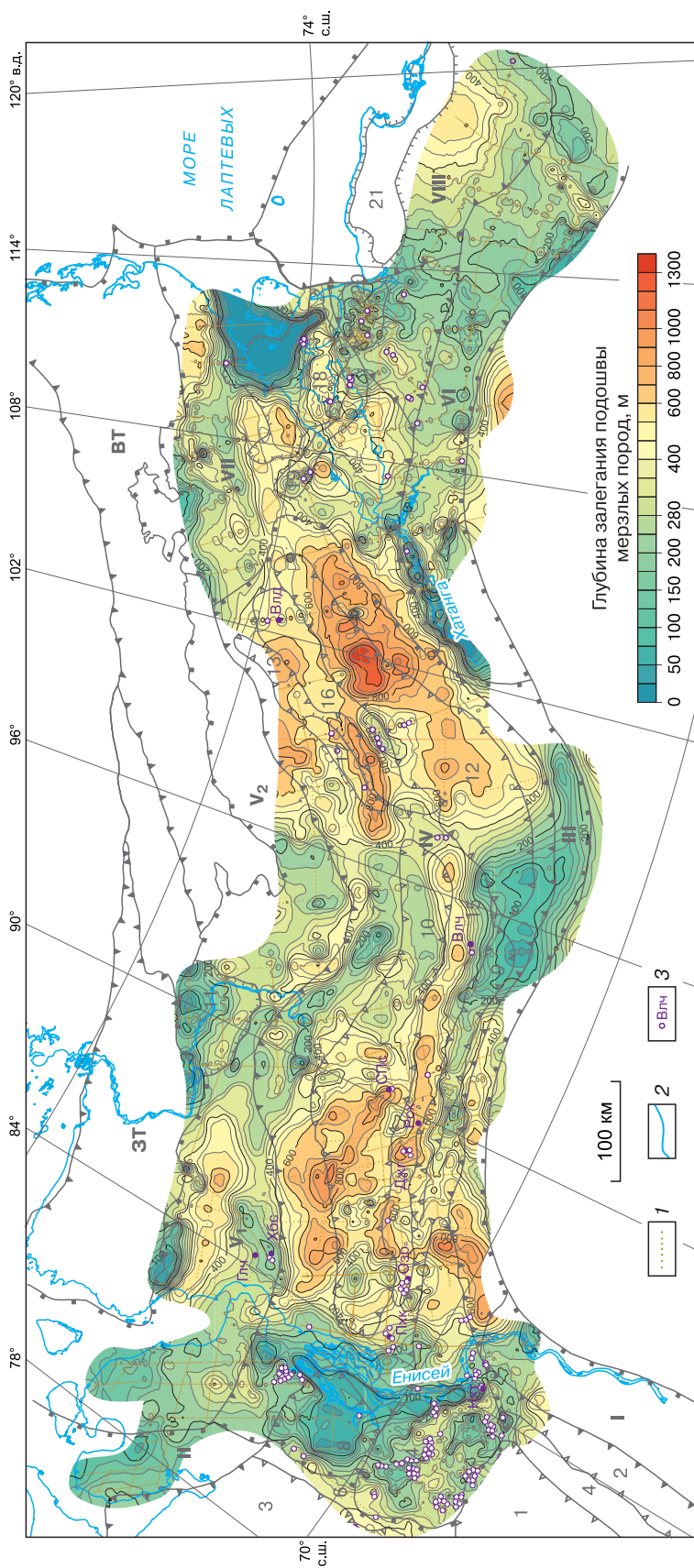


Рис. 10. Карта глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород по данным магнитотеллурических зондирований.

1 – пункты МТЗ; 2 – береговая линия; 3 – скважины глубокого бурения: Джг – Джангодская-4, СПс – Северо-Пясинская-1, Пхк – Пайяхская-1, Влд – Владимирская-21, Нхт – Нижнехетская-1, Влч – Волочанская-2, Озр – Озерная-2, Рсх – Рассохинская-1, Хбс – Хабейская, Глч – Гольчихинская. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1.

можно проследить на запад вплоть до Енисейской губы. Очевидно, это связано с приближением к поверхности существенно песчаного слоя, как на участке со 120 по 160 км разреза по линии 2 (см. рис. 8).

Восточная часть ЕХРП характеризуется высокой мощностью ММП – 500–800 м. Балахнинский мегавал и Кубалахский вал отмечены уменьшенной глубиной залегания подошвы ММП – порядка 350–500 м (разрез по линии 3, см. рис. 8). Между валами выделяется полоса увеличенной до 800–900 м мощности ММП. Аномально большая мощность мерзлоты (более 1000 м) наблюдается в пределах восточного замыкания Боганидско-Жданихинского мегапрогиба. Кроме того, вся северо-восточная часть этого мегапрогиба характеризуется мощностью ММП более 800 м.

Восточная часть территории исследований не имеет ярких аномалий. В целом Анабаро-Хатангская седловина выделяется умеренными значениями мощности слоя ММП – 350–500 м. Анабарская моноклиза и Лено-Анабарская впадина – по-

ниженными (200–300 м), наименьшая мощность в долине р. Анабар. Под Хатангским заливом мощность мерзлоты небольшая и может иметь нулевые значения.

Многолетнемерзлые породы под Хатангским заливом

На востоке изучаемой территории часть профилей МТЗ прошла непосредственно через Хатангский залив, измерения производились со льда. Магнитное поле регистрировалось индукционными датчиками, расположенными на поверхности льда. Электрическое поле измерялось специальными электродами, расположенными в пробуренных во льду отверстиях в нижней части ледового покрова.

Эти данные позволили впервые изучить полное строение ММП в акватории залива. Установление мощности ММП в Хатангском заливе в настоящее время имеет важное практическое значение для проведения начатых здесь буровых работ. Для постановки буровой платформы в Хатангском

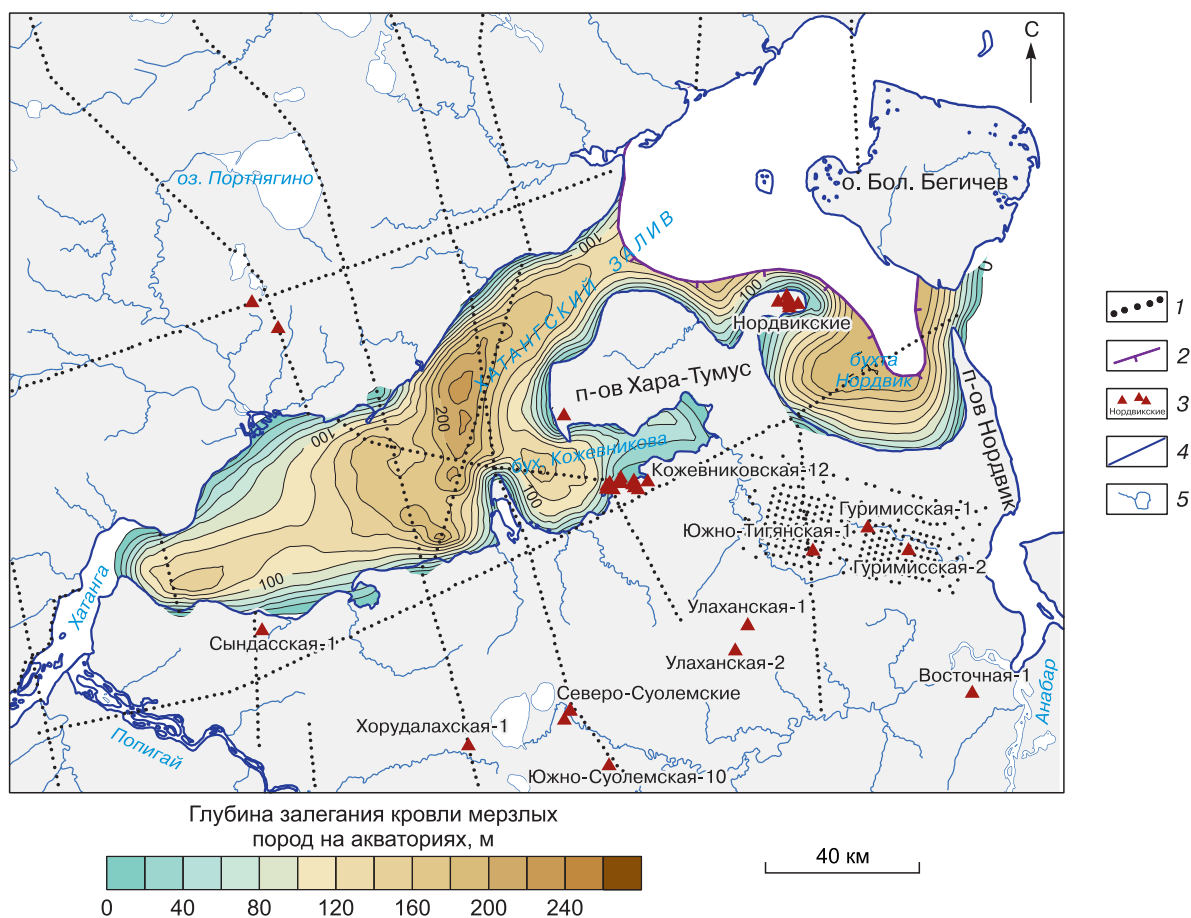


Рис. 11. Карта положения кровли мерзлых пород в акватории Хатангского залива.

1 – пункты МТЗ; 2 – граница выклинивания толщи мерзлых пород; 3 – скважины глубокого бурения и их названия; 4 – береговая линия; 5 – реки и озера.

заливе необходима информация о наличии мерзлоты, положении ее кровли и подошвы.

На рис. 9 представлены геоэлектрические разрезы по данным МТЗ до глубины 1.5 км по отрезку профиля, пересекающему Хатангский залив (см. рис. 9, а), на северном берегу Хатангского залива (см. рис. 9, б, в) и через бухту Нордвик (см. рис. 9, з). Шаг МТЗ по профилю – 1 км. Разрезы построены по результатам автоматической одномерной инверсии эффективных кривых МТЗ.

Как видно на верхнем разрезе на рис. 9, а, в сухопутной части профиля мощность ММП составляет 300–500 м. В прибрежных зонах Хатангского залива наблюдаются области пониженного сопротивления, связанные, по-видимому, с таликами. Следует отметить, что этот вывод требует проведения более детальных исследований в прибрежной зоне.

Под Хатангским заливом в верхней части разреза породы оттаяли, поэтому их сопротивление до глубины 150–200 м низкое – не более 10 Ом·м. Слой мерзлых пород под заливом имеет мощность 200–250 м и проявлен на разрезе более низкими сопротивлениями, чем на суше – 30–100 Ом·м.

Основной проблемой при изучении мерзлоты на акватории являлись экранирующие свойства слоя воды и верхнего слоя пород в талом состоянии (см. рис. 9, 11). Экранирующий эффект верх-

них проводящих слоев заметно ослабил чувствительность данных к параметрам ММП. Тем не менее полученные результаты позволяют говорить о наличии слоя ММП под акваториями, а также оценить глубину залегания кровли и подошвы этого слоя (см. рис. 11).

В северо-восточной части Хатангского залива толща ММП полностью отсутствует под акваторией (см. рис. 9, б, в). Мерзлые породы также отсутствуют в центральной части бухты Нордвик (см. рис. 9, з).

Несмотря на нерегулярность существующей сети измерений, есть основания полагать, что под остальной частью Хатангского залива присутствует слой ММП. Этот слой имеет ряд особенностей:

- над слоем ММП выделен слой с низким сопротивлением от 3 до 10 Ом·м – это породы в талом состоянии, их мощность колеблется от 50 м у берегов залива до 150–200 м в его центральной части. Как и слой воды, этот слой обладает высокой проводимостью и затрудняет изучение электроразведкой высокоомных ММП под ним;

- слой ММП на геоэлектрическом разрезе проявлен более низкими сопротивлениями, чем на суше, его сопротивление колеблется от 20 до 70–100 Ом·м. Мощность этого высокоомного слоя изменяется от 100 до 300 м. Подошва слоя залегает на глубинах от 340 до 570 м;

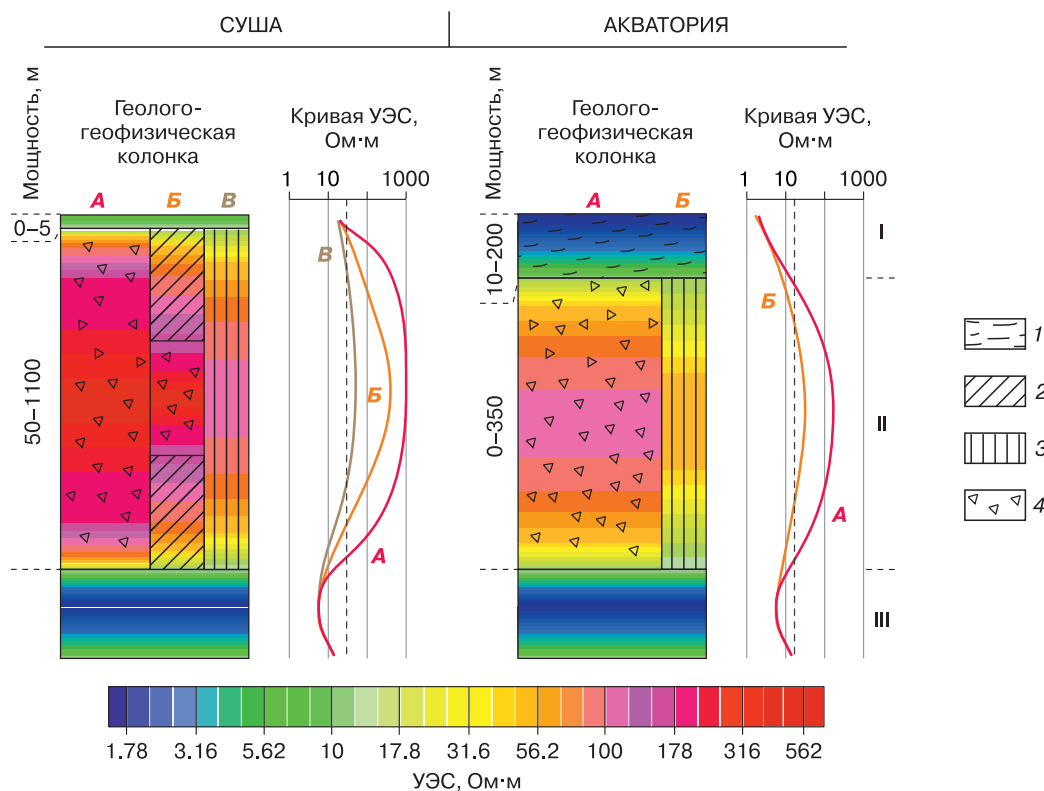


Рис. 12. Обобщенная геоэлектрическая характеристика верхней части разреза района исследований.

I – талый слой в верхней части разреза; II – слой ММП; III – подстилающие юрско-меловые терригенные породы. 1 – талый слой под акваториями; 2 – зоны частичного протаивания; 3 – зоны сплошного протаивания; 4 – породы в мерзлом состоянии.

– на всех профилях, пересекающих западную часть Хатангского залива, в слое ММП имеются сквозные зоны пониженных сопротивлений. Большая часть таких зон наблюдается на границе перехода акватория–суша;

– вследствие экранирующих свойств слоя воды и талого слоя над мерзлыми породами точность определения параметров ММП ниже, чем на суше. Если на суше оценки показывают, что в среднем точность определения подошвы ММП составляет 5–7 % от мощности, то на акватории точность падает до 15–20 %. Этот параметр тем хуже, чем больше мощность экранирующих слоев и в первую очередь слоя воды, так как его сопротивление на порядок меньше, чем у слоя пород в талом состоянии.

Приведенные результаты МТЗ демонстрируют возможности электроразведки по изучению мерзлоты не только на суше, но и на акваториях и в переходных зонах, что в свете планов по освоению северного шельфа является весьма важной практической задачей.

На основе обобщения результатов электроразведочных работ составлена геоэлектрическая характеристика верхней части разреза района исследований. Она приведена на рис. 12 отдельно для суши и акваторий. Основные отличия – наличие талого слоя сверху, контраст и уровень сопротивления ММП. Данная характеристика может служить априорной информацией о регионе исследований при проектировании новых работ или для численного моделирования.

Подмерзлотные аномалии повышенного электрического сопротивления

В 2015 г. работы МТЗ на западе изучаемой территории впервые проводились с шагом 500 м по профилю, а сами профили проходили через известные месторождения углеводородов Пайяхское, Байкаловское и Озерное. При интерпретации полученных электроразведочных данных была выявлена закономерность: над этими месторождениями в верхней части разреза на глубинах 300–

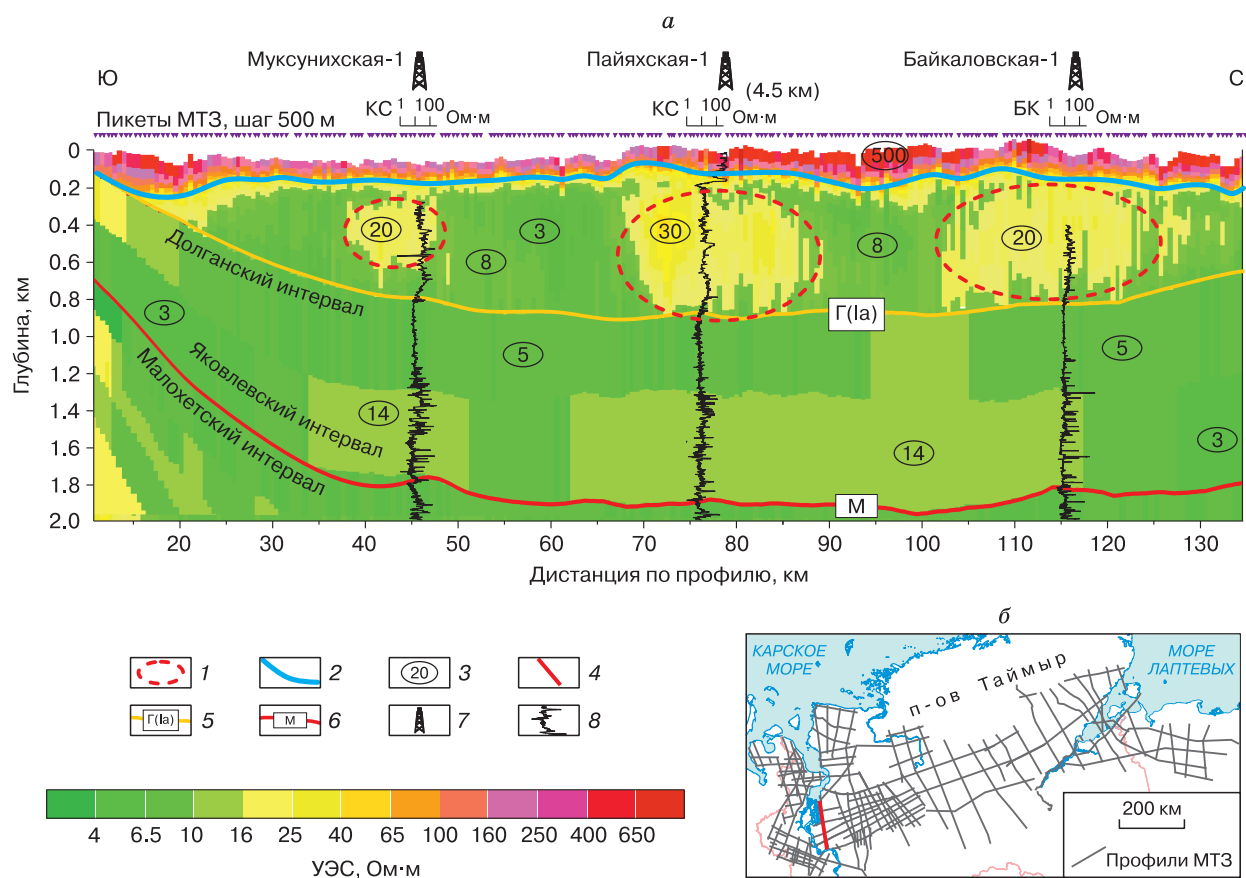


Рис. 13. Геоэлектрический разрез верхних 2 км с подмерзлотными аномалиями повышенного электрического сопротивления по профилю 501 на западе Енисей-Хатангского регионального прогиба (а) и схема региональных электроразведочных профилей района исследований (б).

1 – подмерзлотные аномалии повышенного сопротивления; 2 – подошва слоя ММП по данным электроразведки; 3 – среднее значение УЭС в слое; 4 – положение профиля на схеме; 5, 6 – сейсмические горизонты и их индексы (5 – кровля долганской свиты верхнего мела, 6 – кровля нейтинской (кошайской) глинистой пачки нижнего мела); 7 – скважины глубокого бурения; 8 – картаж сопротивления в скважинах.

800 м под слоем ММП присутствуют аномальные зоны повышенного удельного электрического сопротивления [Афанасенков и др., 2015].

На рис. 13 приведен геоэлектрический разрез по одному из профилей 2015 г., расположенному в западной части ЕХРП, на правом берегу Енисея, и проходящему через Пайяхское и Байкаловское месторождения. На разрезе выделены подмерзлотные аномалии повышенного сопротивления (АПС). В данном случае наиболее вероятным объяснением этих аномалий являются скопления газогидратов [Waite et al., 2009]. Именно на глубинах 300–800 м расположена зона стабильности газогидратов (ЗСГ) при данных термобарических условиях. Механизм образования скоплений газогидратов на этих глубинах описан во многих работах [Макогон, 2010; Сивцев, Рожин, 2011]. В некоторых публикациях [Якушев, 2009] отмечается наличие промежуточной зоны между ММП и ЗСГ. На представленном разрезе эта промежуточная зона фиксируется понижением сопротивления на глубинах 200–300 м.

Благодаря проводящей переемычке подмерзлотные АПС явно отделяются от слоя мерзлых пород. Способствует такому разделению малая мощность ММП: подошва ММП находится на глубине 150–200 м, а кровля ЗСГ – на глубине около 300 м. Соответственно, наблюдать аномалии подобного типа можно везде, где мощность ММП меньше 250–300 м. К этим территориям относится вся Приенисейская полоса ЕРХП, юго-западная часть Боганидско-Жданихинского мегапрогиба, долина р. Анабар, а также отдельные зоны меньшего размера (см. рис. 10). Такие аномалии названы изолированными, или АПС первого типа (рис. 14, I). Для них характерно: явное отделение аномалий от слоя ММП слоем пониженного сопротивления; субгоризонтальное строение фонового разреза и, соответственно, отсутствие в верхней части разреза аномалий сопротивления, связанных со структурно-морфологическим фактором.

Если же положение подошвы ММП находится ниже кровли ЗСГ, то подмерзлотные аномалии, связанные со скоплениями УВ на больших глубинах, будут подстилать слой ММП. Подобные аномалии выявлены над Озерным месторождением. Они отнесены ко второму типу и названы присоединенными (см. рис. 14, II). На рис. 14 заметно локальное увеличение мощности ММП и размытие его нижней границы. Это, вероятно, связано с замещением воды в поровом пространстве газом или газогидратами. Относительная локальность аномалии может объясняться слабой горизонтальной проницаемостью слоев в верхней части разреза. Контуры АПС в таком случае будут близки к контурам залежи на глубине. Характерными особенностями аномалий второго типа являются: локальное увеличение мощности слоя ММП, не свя-

занное со структурным фактором; размытие нижней границы слоя ММП на геоэлектрических разрезах.

Третий тип аномалий выявлен над Джангодской залежью на Рассохинском мегавалу. Здесь песчаный слой-коллектор над валом приближается к поверхности и попадает в зону отрицательных температур. Свободная поровая влага в этом слое замерзает, подошва толщи ММП оказывается на большей глубине. Замерзшая в слое-коллекторе вода закупоривает поры, промерзший интервал становится флюидоупором. Мигрирующие вверх по склону в слое-коллекторе УВ могут скапливаться в его присводовых частях, закупоренные, как пробкой, мерзлыми породами. Из-за скопления УВ в склоновых частях слоя-коллектора, ниже криолитозоны, его сопротивление повышается до 30–100 Ом·м (см. рис. 14, III) на фоне 17–30 Ом·м в погруженных участках. Этот тип аномалий назван структурно-морфологическим. О выделении подобных структурно-морфологических скоплений газа и газогидратов есть ряд публикаций (например, [Полозков и др., 2011]). Особенности АПС третьего типа: наличие локальных зон увеличения мощности ММП за счет структурного фактора; увеличение в песчаном пласте-коллекторе сопротивления в подмерзлотном слое.

По всем разрезам региона исследований были выделены аномалии всех трех типов. Практически всем известным месторождениям соответствуют подмерзлотные аномалии повышенного сопротивления I типа, так как большая часть месторождений расположена на западе исследуемой территории, где мощность ММП относительно небольшая. Стоит отметить, что по крайней мере часть скоплений газа или газогидратов на площадях бурения могли образоваться за счет заколонных перетоков газа. О такой возможности упоминается в некоторых работах [Сивцев, Рожин, 2011].

Если с выделением АПС первого типа особых проблем нет, то выделить среди аномалий второго и третьего типа именно те, к которым приурочены скопления газа или газогидратов, сложно. Это связано с тем, что, как показано выше, локальное увеличение мощности ММП может быть обусловлено изменением литологических особенностей пород. Размытая подошва слоя ММП может объясняться постепенной сменой в разрезе преобладания песчаников на глины. Для уверенного выделения аномалий третьего типа необходимо знать глубину проникновения криолитозоны, чтобы выделить зоны повышенного сопротивления, вызванные промерзанием пород, от тех, которые связаны со скоплениями УВ.

Необходимо также отметить, что подмерзлотные АПС первого и второго типа приурочены к залежам УВ непосредственно под ними. В то же время источники аномалий третьего типа могут быть

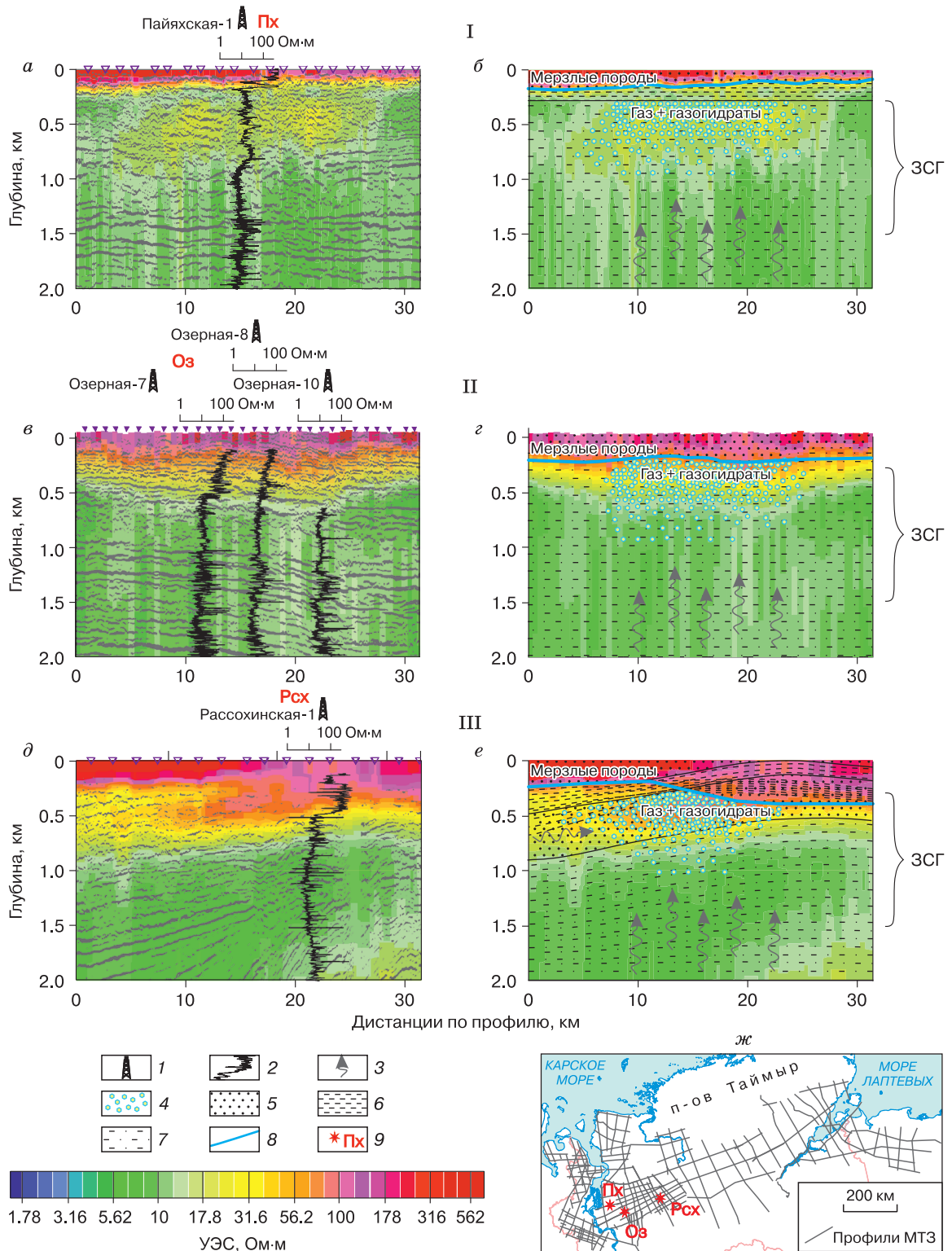


Рис. 14. Три типа подмерзлотных аномалий повышенного электрического сопротивления (I–III).

а, в, г – совмещенные сейсмические и геоэлектрические разрезы в районе скважин: а – Пайяхских (Пх), в – Озерных (Оз), г – Рассохинской (Рсх); б, з, е – соответствующие геолого-геофизические модели; ж – схема региональных электроразведочных профилей района исследований. 1 – скважины глубокого бурения; 2 – короткаж сопротивления в скважинах; 3 – направление миграции углеводородов; 4 – скопления газа и газогидратов; 5 – песчаные породы; 6 – глинистые породы; 7 – песчано-глинистые породы; 8 – подошва ММП; 9 – положение и индекс скважины на схеме. ЗСГ – зона стабильности газогидратов.

расположены в стороне от самой аномалии, поскольку УВ могли мигрировать вдоль соответствующего пласта-коллектора благодаря его высокой латеральной проницаемости и наклонному залеганию.

Подводя итог, констатируем, что наличие подобных подмерзлотных аномалий повышенного сопротивления можно воспринимать как один из поисковых признаков скоплений УВ на глубине. Таким образом, открываются следующие возможности:

1. Прогнозирование нефтегазоносности.

Прямая корреляция выявленных в верхней части разреза аномалий с промышленными залежами углеводородов в нижележащих продуктивных пластах позволяет использовать данные аномалии для прогноза залежей УВ в глубоких горизонтах.

2. Определение контуров залежей. В зонах с субгоризонтальным залеганием пластов и субвертикальными тектоническими нарушениями в верхней части разреза миграция происходит в основном в вертикальном направлении. Поэтому можно сделать предположение о некотором соответствии контуров аномалий и контуров скоплений УВ на глубине.

3. Выявление участков инженерно-геологических опасностей, прогнозирование зон осложнений при бурении. Очевидно, что скопления газа и газогидратов под слоем ММП при его высвобождении могут вызвать разрушение инженерных сооружений, находящихся на поверхности. Полученные аномалии могут маркировать участки разреза, которые несут опасность при буровых работах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря региональному изучению комплексом геофизических методов северного обрамления Сибирской платформы, которое начато в 2005 г. и продолжается в настоящее время, получены новые данные о геологическом строении региона [Афанасенков и др., 2018]. Результаты электроразведочных работ, входящих в геофизический комплекс, позволили получить большой объем новой информации о строении криолитозоны. На основе представленных в статье результатов можно сделать следующие выводы.

1. Электроразведочные методы МТЗ и ЗСБ позволяют надежно выделять в верхней части разреза контрастный слой повышенного сопротивления, который авторами рассматривается как толща пород в мерзлом состоянии, а также выделять в этом слое локальные неоднородности: талики, локальные участки изменения мощности.

2. Часть пород в криолитозоне находится в охлажденном состоянии (температуры отрицательные, но поровая вода не замерзает) и поэтому по сопротивлению не отличается от подстилаю-

щих. Основной причиной наличия незамерзших поровых растворов в зоне отрицательных температур является преобладание в данном интервале разреза глин со связанной водой в порах. Вследствие этого мощность криолитозоны в Приенисейской полосе, определяемая по результатам термометрии в скважинах, существенно больше мощности мерзлых пород по электроразведочным данным.

3. Основным фактором, определяющим закономерности изменения мощности ММП в исследуемом регионе, являются структурно-литологические особенности разреза.

4. Построенная карта глубины залегания подошвы ММП, основанная на большом объеме фактического материала, отражает региональные закономерности распространения этого слоя. Наименьшую мощность ММП имеют в долинах рек Енисей и Хатанга (местами менее 20 м), наибольшую – на восточном замыкании ЕХРП – более 1000 м.

5. Данные МТЗ позволили определить, что в северо-восточной части Хатангского залива и в центре бухты Нордвик ММП отсутствуют. На западе Хатангского залива и в прибрежной части бухты Нордвик мощность ММП составляет около 350 м. Над слоем ММП расположен слой пород в талом состоянии мощностью до 200 м в центре акваторий.

6. Выделены подмерзлотные аномалии повышенного сопротивления трех типов. Корреляция положения аномалий и известных месторождений позволяет связать эти аномалии со скоплением газогидратов и свободного газа в подмерзлотном слое.

Авторы выражают особую благодарность за помощь в подготовке статьи В.Е. Тумскому, А.П. Афанасенкову, Е.П. Широковой, Д.Г. Кушину, а также рецензентам Е.Ю. Соколовой и И.Н. Модину.

Литература

Агеев В.В., Агеев Д.В. Изучение мерзлых разрезов Якутии с помощью зондирования становлением поля в ближней зоне и вертикального электрического зондирования методом вызванной поляризации // Инж. геология, 2017, № 2, с. 64–69.
 Ageev, V.V., Ageev, D.V., 2017. The study of permafrost cross-sections in Yakutia using TEM and VES-IP methods. Inzhenernaya Geologia, No. 2, 64–69.
 Афанасенков А.П., Волков Р.П., Яковлев Д.В. Аномалии повышенного электрического сопротивления под слоем многолетнемерзлых пород – новый поисковой признак залежей углеводородов // Геология нефти и газа, 2015, № 6, с. 40–53.
 Afanasenkov, A.P., Volkov, R.P., Yakovlev, D.V., 2015. High electrical resistivity anomalies in rocks underlying permafrost as new indication of hydrocarbon accumulations. Geologia nefiti i gaza, No. 6, 40–53.

- Афанасенков А.П., Обухов А.Н., Чикишев А.А. и др.** О тектонике северного обрамления Сибирской платформы по результатам комплексного анализа геолого-геофизических данных // Геология нефти и газа, 2018, № 1, с. 7–27.
Afanasenkov, A.P., Obukhov, A.N., Chikishev, A.A., et al., 2018. Tectonics of northern margin of the Siberian Platform from the comprehensive analysis of geological and geophysical data. *Geologia nefiti i gaza*, No. 1, 7–27.
- Афанасенков А.П., Яковлев Д.В.** Применение электро-разведки при изучении нефтегазоносности северного обрамления Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2018, т. 59, № 7, с. 1029–1049.
Afanasenkov, A.P., Yakovlev, D.V., 2018. Application of electrical prospecting methods to petroleum exploration on the northern margin of Siberian Platform. *Geologia i Geofizika* (Russian Geology and Geophysics) 59 (7), 1029–1049.
- Баранов М.А., Компаниец С.В., Буддо И.В. и др.** Возможности электромагнитных зондирований при картировании многолетнемерзлых пород // Вестн. ИрГТУ, 2014, № 7 (90), с. 25–30.
Baranov, M.A., Kompaniets, S.V., Buddo, I.V., et al., 2014. Applications of electromagnetic soundings to subsurface permafrost mapping. *Vestnik IrGTU* 7 (90), 25–30.
- Бердичевский М.Н.** Модели и методы магнитотеллурики / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев. М., Науч. мир, 2009, 680 с.
Berdichevskii, M.N., Dmitriev, V.I., 2009. Models and Methods of Magnetotellurics. Nauchny mir, Moscow, 680 pp. (in Russian)
- Ершов Э.Д.** Общая геокриология. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 682 с.
Ershov, E.D., 2002. General Geocryology. Moscow University Press, Moscow, 682 pp. (in Russian)
- Зыков Ю.Д.** Геофизические методы исследования криоли-тозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 1999, 243 с.
Zykov, Yu.D., 1999. Geophysical Methods of Permafrost Studies. Moscow University Press, Moscow, 243 pp. (in Russian)
- Макогон Ю.Ф.** Газогидраты. История изучения и перспекти-вы освоения // Геология и полез. ископаемые Мирового океана, 2010, № 2, с. 5–21.
Makogon, Yu.F., 2010. Gas Hydrates. History of study and prospects for development. *Geologia i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*, No. 2, 5–21.
- Ним Ю.А.** Импульсная электроразведка криолитозоны / Ю.А. Ним, А.В. Омеляненко, В.В. Стогний. Новосибирск, ОИГГМ, 1994, 189 с.
Nim, Yu.A., Omelyanenko, A.V., Stognii, V.V., 1994. Electro-magnetic Induction Resistivity Surveys in Permafrost. OIGGM SO RAN, Novosibirsk, 189 pp. (in Russian)
- Огильви А.А.** Основы инженерной геофизики. М., Недра, 1990, 501 с.
Ogil'vi, A.A., 1990. Fundamentals of Engineering Geophysics. Nedra, Moscow, 501 pp. (in Russian)
- Полозков А.В., Астафьев Д.А., Истомин В.А. и др.** Выявление газогидратных зон в низкотемпературных породах при строительстве скважин и ожидаемые типы газогидрат-ных залежей // Вести газовой науки, 2011, № 3 (8), с. 78–86.
Polozkov, A.V., Astafiev, D.A. Istomin, V.A., et al., 2011. Detec-tion of gas hydrate zones in low-temperature rocks when con-structing wells and expected types of gas-hydrate deposits. *Vesti gazovoy nauki* 3 (8), 78–86.
- Романовский Н.Н.** Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 231 с.
Romanovsky, N.N., 1983. Underground Waters in Cryolitho-zone. Moscow University Press, Moscow, 231 pp. (in Russian)
- Рыжов А.А., Судоплатов А.Д.** Расчет удельной электро-проводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологи-ческих задач // Научно-технические достижения и передо-вой опыт в области геологии и разведки недр. М., ВИЭМС, 1990, с. 27–41.
Ryzhov, A.A., Sudoplatov, A.D., 1990. Conductivity calculations of sand-clays the use of functional dependences for solving hy-drogeological problems, in: Scientific-technical achievements in geology and subsurface prospecting. VIEMS, Moscow, pp. 27–41. (in Russian)
- Сивцев А.И., Рожин И.И.** Нетрадиционный флюидоупор мерзлотно-гидратного генезиса // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. по инженерному мерзлотоведению. Тю-мень, Фундаментстройаркос, 2011, с. 138–142.
Sivtsev, A.I., Rozhin, I.I., 2011. Unconventional impermeable permafrost seal of hydrate origin, in: Proceedings of The Inter-national Engineering Permafrost Conference, NPO Fundament-stroiarkos ООО, Tyumen, pp. 138–142. (in Russian)
- Хмелевской В.К.** Основы геофизических методов / В.К. Хмелевской, В.И. Костицын. Пермь, Перм. ун-т, 2010, 400 с.
Khmelevsky, V.K., Kostitsin, V.I., 2010. Basics of Geophysical Methods. Perm University, Perm, 400 pp. (in Russian)
- Электроразведка:** пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под ред. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. М., ГЕРС, 2005, 311 с.
Khmelevsky, V.K., Modin, I.N., Yakovlev, A.G. (Eds.), 2005. Electrical Methods: a Guide for Electric Survey Practice for Students majoring in Geophysics. GERS, Moscow, 311 pp. (in Russian)
- Якупов В.С.** Геофизика криолитозоны. Якутск, Изд-во Якут. ун-та, 2008, 342 с.
Yakupov, V.S., 2008. Geophysics of the Cryolithozone. Izdat-vo Yakutskogo un-ta, Yakutsk, 342 pp. (in Russian)
- Якушев В.С.** Формирование скоплений природного газа и газовых гидратов в криолитозоне: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 2009, 249 с.
Yakushev, V.S., 2009. Formation and accumulation of natural gas and gas hydrates in the permafrost. Dissertation, to obtain the degree of Doctor Sci. in geol.-mineral., Moscow, 249 pp. (in Russian)
- Constable, S.C., Parker, R.L., Constable, C.G.** Occam's in-verse – A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // *Geophysics*, 1987, No. 52, p. 289–300.
- Koziar, A., Strangway, D.W.** Magnetotelluric sounding of permafrost // *Science*, 1975, No. 190 (4214), p. 566–568.
- Koziar, A., Strangway, D.W.** Permafrost mapping by audio-frequency magnetotellurics // *Can. J. Earth Sci.*, 1978, No. 15 (10), p. 1539–1546.
- Osterkamp, T.E.** Sub-sea permafrost // *Encyclopedia of Ocean Sciences*. N.Y., Acad. Press, 2001, p. 2902–2912.
- Sternberg, B.K., Washburne, J.C., Pellerin, L.** Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromag-netic soundings // *Geophysics*, 1988, No. 53 (11), p. 1459–1468.
- Waite, W., Santamarina, J., Cortes, D., et al.** Physical proper-ties of hydrate-bearing sediments // *Rev. Geophysics*, 2009, vol. 47, RG4003, DOI: 10.1029/2008RG000279.

Поступила в редакцию
31 января 2018 г.