

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ СЕВЕРНОГО ОБРАМЛЕНИЯ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

А.П. Афанасенков, Д.В. Яковлев\*

*Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт,  
105118, Москва, шоссе Энтузиастов, 36, Россия*

*\*ООО «Северо-Запад», 142784, Москва, Киевское шоссе 2/1, БЦ «Румянцево», оф. 412а, Россия*

Рассмотрены основные возможности современной электроразведки при изучении нефтегазоносности северного обрамления Сибирской платформы — обширного региона от Гыдана до устья Лены. В основе статьи лежит обобщение результатов региональных электроразведочных работ за последние 12 лет в указанном регионе. Сформулированы возможности электроразведки при решении следующих четырех задач: изучение в комплексе с сейсморазведкой и бурением юрско-меловой части разреза; изучение строения палеозойского комплекса; изучение зон сочленения крупных геоблоков, глубинного строения земной коры и верхней мантии; изучение криолитозоны.

*Электроразведка, МТЗ, ЗСБ, региональные исследования, Енисей-Хатангский региональный прогиб, Гыдан, Анабаро-Хатангская седловина, Таймыр*

## APPLICATION OF ELECTRICAL PROSPECTING METHODS TO PETROLEUM EXPLORATION ON THE NORTHERN MARGIN OF THE SIBERIAN PLATFORM

A.P. Afanassenkov and D.V. Yakovlev

This paper considers the potential of modern electrical prospecting methods for evaluating oil and gas occurrence on the northern margin of the Siberian Platform—a vast region from the Gydan Peninsula to the mouth of the Lena River. Results of regional electrical surveys over the past 12 years in this region are generalized. The capabilities of electrical prospecting for solving the following four problems are defined: survey, in conjunction with seismics and drilling, in the Jurassic–Cretaceous part of the section; study of the structure of the Paleozoic sequence; study of the junction zones of large geoblocks and deep structure of the Earth's crust and upper mantle; and study of the permafrost.

*Electrical prospecting, magnetotelluric sounding, TDEM, regional studies, Yenisei–Khatanga regional trough, Gydan, Anabar–Khatanga saddle, Taimyr*

### ВВЕДЕНИЕ

Территория исследований охватывает северное обрамление Сибирской платформы, где в последние годы проводится большой объем региональных наземных геофизических работ. К этому региону относятся: Гыданский полуостров, Таймырский полуостров, включая Енисей-Хатангский региональный прогиб (ЕХРП), Горный Таймыр, Лено-Анабарский прогиб, включая Анабаро-Хатангскую седловину. В комплекс проводимых здесь геофизических работ входит и электроразведка методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) [Keller, 1968; Vozoff, 1972].

Первые работы методом МТЗ в регионе исследований были проведены еще в 60-е годы XX в. в западной части ЕХРП. По результатам тех работ была сделана оценка мощности терригенного комплекса в центральной части прогиба и определен предположительный состав и возраст пород, подстилающих терригенные отложения.

Второй этап применения электроразведки в ЕХРП — 1980-е годы, когда работы методом МТЗ проводились с применением передовой для своего времени цифровой аппаратуры ЦЭС-2. Целью исследований на этом этапе первоначально являлось изучение глубинного геологического строения. Однако после обработки данных МТЗ на Среднеяровской площади было решено расширить круг задач, а именно в направлении применения этого метода для «прямых» геофизических поисков залежей УВ. Результаты работ тех лет показали, что применение метода МТЗ с целью решения задачи «прямых» геофизических поисков залежей УВ позволяет выделить его в качестве одного из основных методов при подготовке «аномалий типа залежь» (АТЗ) [Салов и др., 1984].

Новый этап в проведении электроразведочных работ в пределах северного обрамления Сибирской платформы начался в 2005 г. и продолжается в настоящее время. На этом этапе используются современные канадские станции компании «Phoenix Geophysics» и новейшие программы обработки и интерпретации данных. Он характеризуется высокой информативностью электроразведочных работ. За прошедшие с начала нового этапа 12 лет было выполнено порядка 20 000 км профилей МТЗ или около 15 000 точек МТЗ (рис. 1).

Прогресс обработки и интерпретации электроразведочных данных, связанный с развитием программного обеспечения, позволяет получать достоверную информацию о геоэлектрическом строении даже в случае сложного строения среды (рис. 2).

По результатам современных электроразведочных работ, можно сформулировать основные задачи, которые данный метод позволяет решать при изучении геологического строения северного обрамления Сибирской платформы:

1. При изучении мезозойских отложений в комплексе с сейсморазведкой и бурением с помощью электроразведки можно строить схемы и разрезы региональных литологических особенностей, а также прогнозные карты развития коллекторов и флюидоупоров.

2. Изучение строения, литологических особенностей и тектоники в палеозойском комплексе разреза. В тех зонах региона исследований, где палеозойские отложения находятся на достижимых для бурения глубинах, электроразведка по информативности при изучении сложностроенного палеозойского комплекса сопоставима с сейсморазведкой. Поэтому комплексирование этих методов, наряду с гравиразведкой и магниторазведкой (потенциальные поля) [Афанасенков и др., 2016а], позволяет многократно увеличить геологическую информативность работ [Bedrosian, 2007].

3. Решение глубинных задач: изучение зон сочленения крупных геоблоков, строения земной коры и верхней мантии, крупных тектонических зон.

4. Изучение многолетнемерзлых пород и подмерзлотных скоплений углеводородов (УВ). Выявленные в результате работ на Новотаймырской площади в 2015 г. подмерзлотные аномалии повышенного сопротивления над месторождениями углеводородов, являются не просто важным научным результатом, но и новым поисковым признаком [Афанасенков и др., 2016а]. Кроме того, изучение электроразведкой мощности и неоднородности слоя мерзлых пород важно как при проведении инженерных и буровых работ, так и геофизических. В частности, эту информацию желательно учитывать при вводе поправок за верхнюю часть разреза (ВЧР) при обработке сейсмических данных.

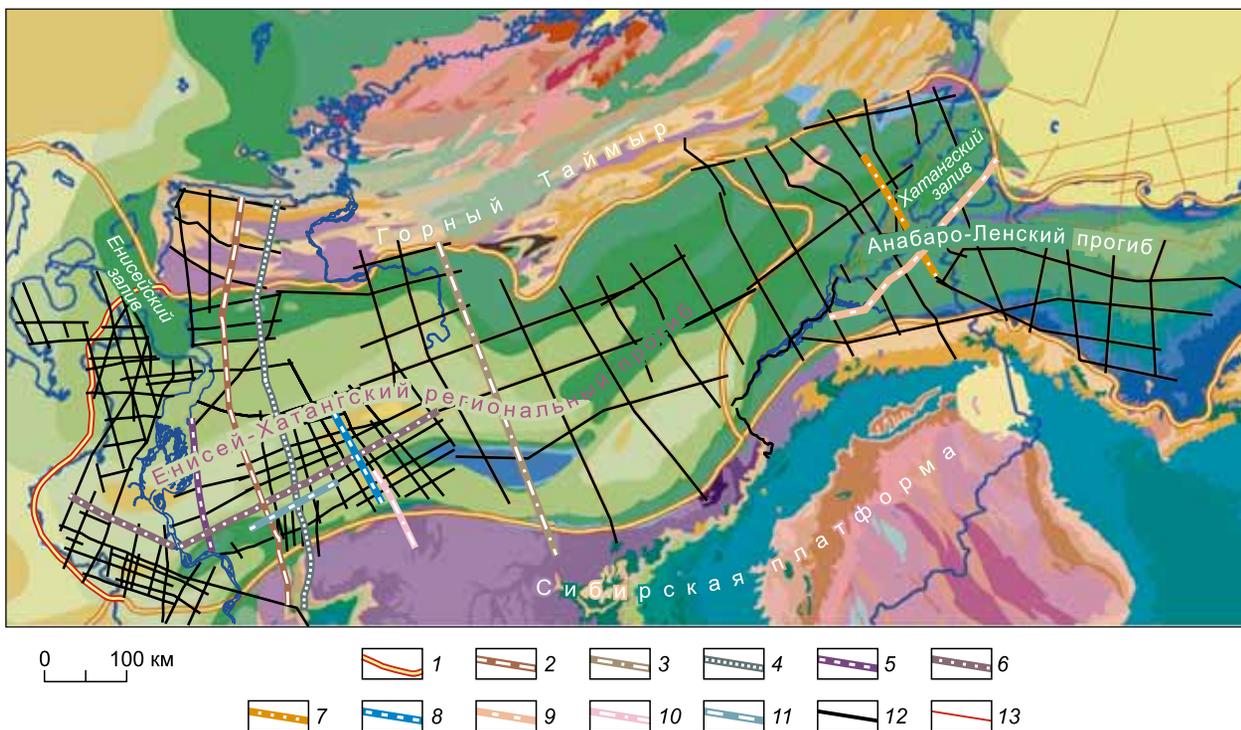
Далее рассмотрим некоторые примеры решения электроразведкой каждой из перечисленных задач.

### **ВЫЯВЛЕНИЕ ЗОН РАЗВИТИЯ КОЛЛЕКТОРОВ В МЕЗОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ**

Основные перспективы обнаружения залежей УВ в регионе исследований в настоящее время связывают, в первую очередь, с юрско-меловыми отложениями, нефтегазоносность которых уже доказана многочисленными месторождениями на западе территории исследований. Важную роль при изучении мезокайнозойских отложений играет комплексирование геофизических методов и скважинных данных.

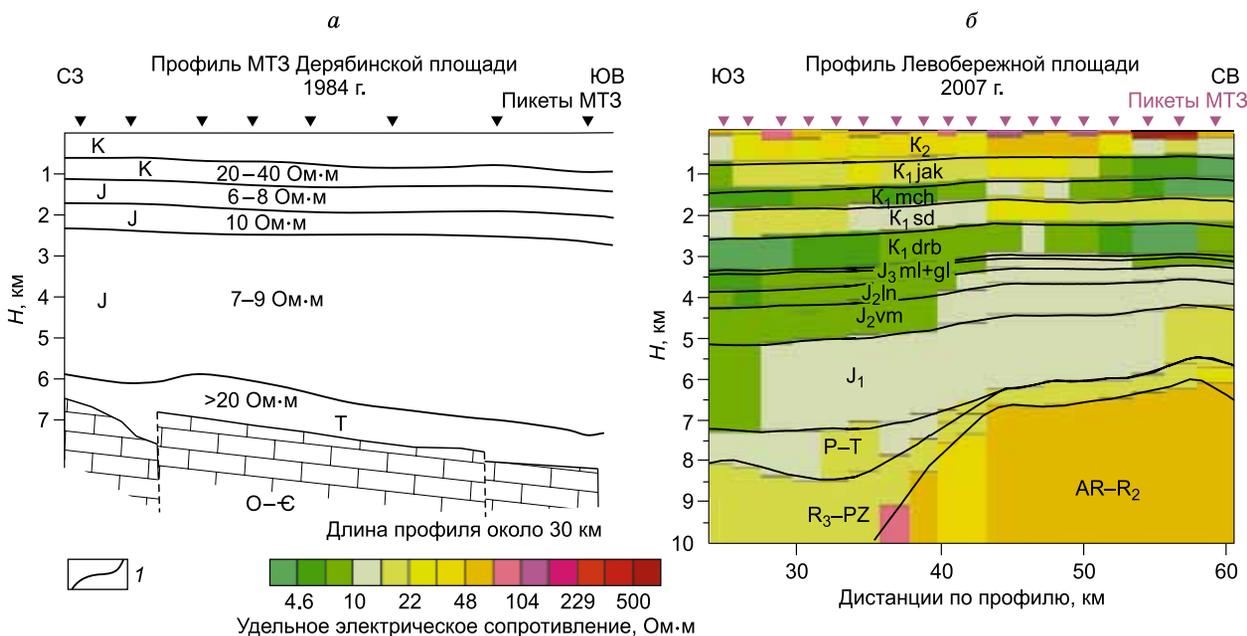
Терригенными юрско-меловыми отложениями покрыта большая часть территории исследований. Они имеют мощность до 10 км в северной системе прогибов ЕХРП и полностью выклиниваются на северном и южном бортах прогибов. Пологое залегание юрско-меловых отложений позволяет использовать следующий подход при комплексной интерпретации результатов электроразведочных и сейсморазведочных исследований: положение границ основных толщ определялось по данным сейсморазведки, а на основе данных МТЗ подбирались значения их сопротивления, осредненные по всей мощности толщи [Berdichevsky et al., 2015]. При этом если в рамках заданной геометрии подобрать кривую МТЗ не удавалось, то вводились дополнительные геоэлектрические границы. При подборе значений сопротивлений использовались результаты электрического каротажа на ближайших скважинах глубокого бурения. Также информация по имеющимся скважинам использовалась для дальнейшей геологической интерпретации полученных геофизических данных.

Обобщение скважинных данных в пределах западной части площади исследования проводилось в два этапа. На первом этапе были построены каротажные кривые и проведено осреднение данных каротажа для выделения крупных интервалов с однородной геоэлектрической и литологической характеристикой (рис. 3). Второй этап обобщения заключался в построении гистограмм распределения сопротивления пород для разных литотипов (рис. 4). По результатам обобщения скважинных данных в пределах ЕХРП, отмечается следующее: в каждом интервале (свите) наименьшим сопротивлением обладают глинистые породы (в среднем около 7—10 Ом·м); алевроитовые породы имеют большее сопротивление, чем глины (в среднем около 15—17 Ом·м); песчаные породы обладают самым большим сопротивлением (в среднем 25—40 Ом·м); наличие известковистого цемента в аргиллитах или песчаниках увеличивает их сопротивление на 10—20 Ом·м.



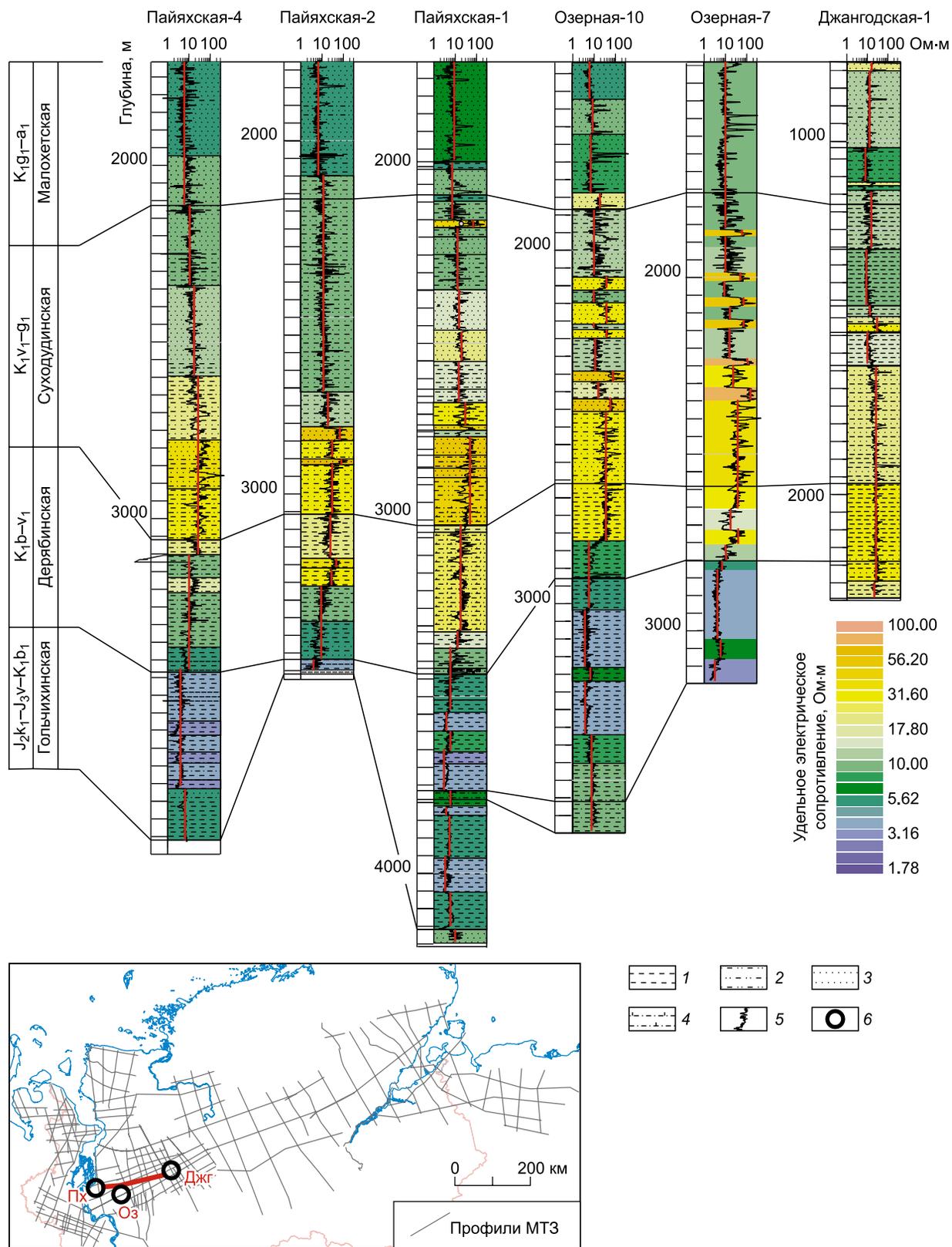
**Рис. 1. Региональные электроразведочные работы XXI столетия в северном обрамлении Сибирской платформы.**

1 — граница региональных прогибов. Региональные электроразведочные профили МТЗ «Нового этапа» изучения Таймыра: 2 — профиль Диксон—оз. Хантайское; 3 — профиль 622 Северо-Таймырской площади; 4 — сводный маршрут по профилям 209-109-120 Правобережной и Танамо-Пясинской площадей; 5 — профиль 501 Новотаймырской площади; 6 — сводный маршрут по профилям 102-112-412 Танамо-Пясинской и Пясинской площадей; 7 — профиль 11 Хатангской площади; 8 — профиль 502 Новотаймырской площади; 9 — профиль 303 Хатангской площади; 10 — профиль 519 Ново-Таймырской площади; 11 — профиль 418 Пясинской площади; 12 — прочие профили МТЗ; 13 — профили МОТТ 2D последних лет, не сопровождавшиеся электроразведочными работами.



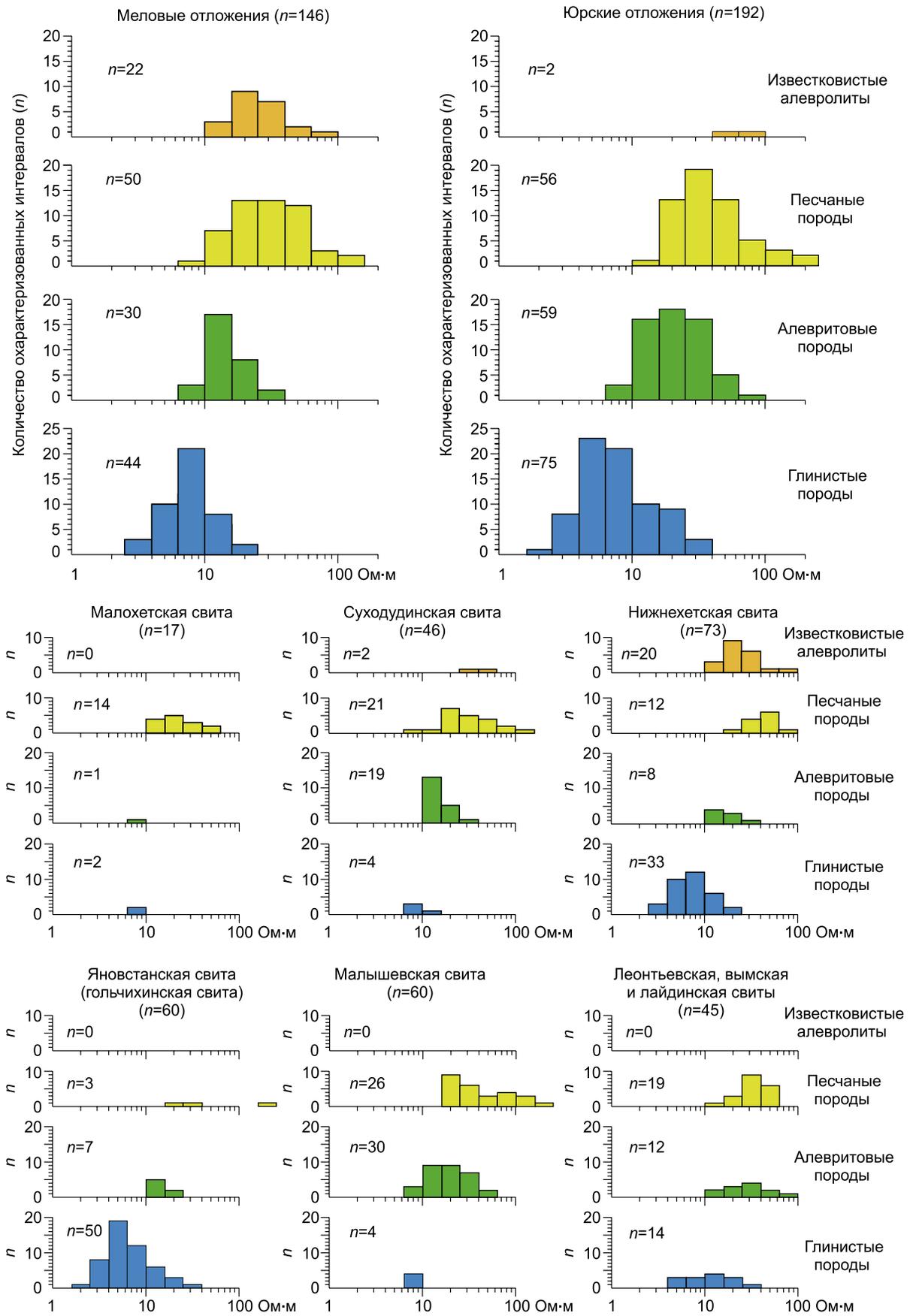
**Рис. 2. Геоэлектрические разрезы в районе Дерябинского месторождения, полученные в 1984 г. (а) и в 2007 г. (б).**

*l* — геоэлектрические границы.



**Рис. 3. Каротажные кривые с геоэлектрической и литологической характеристиками.**

1 — глины, аргиллиты; 2 — алевролиты; 3 — песчаник; 4 — известковистые алевролиты; 5 — кривая бокового каротажа; 6 — площади бурения: Пх — Пайяхская, Оз — Озерная, Джг — Джангодская.



**Рис. 4. Гистограммы распределения значений сопротивления юрско-меловых отложений для различных литотипов терригенных пород.**

То, что песчаные породы имеют более высокое сопротивление, чем глинистые, — особенность юрско-меловых пород ЕХРП. Как известно, сопротивление ионопроводящих пород определяется многими факторами и описывается следующей формулой [Archie, 1942; Дахнов, 1951]:

$$\rho = \rho_v \cdot P_n \cdot P_v \cdot P_r \cdot P_T$$

где  $\rho_v$  — сопротивление поровой влаги,  $P_n$  — параметр пористости,  $P_v$  — параметр влажности,  $P_r$  — параметр глинистости,  $P_T$  — температурный параметр. Выявленная по скважинным данным зависимость сопротивления от литологии показывает, что именно параметр глинистости является основным для юрско-меловых пород в пределах ЕХРП.

Во многих других нефтегазоносных районах песчаные коллекторы имеют пониженное сопротивление, и связано это, в первую очередь, с высокой минерализацией пластовых вод и повышенной пористостью коллекторов. В пределах ЕХРП поровые растворы имеют невысокую минерализацию. По результатам обобщения имеющейся информации о минерализации пластовых вод была построена гистограмма распределения ее значений (рис. 5) из которой видно, что большинство значений укладываются в диапазон от 2 до 12 г/л. При минерализации меньше 15 г/л, согласно теоретическим расчетам [Рыжов, Судоплатов, 1990], увеличение доли глин в терригенных породах будет приводить к уменьшению сопротивления. Именно этим объясняются выявленные зависимости.

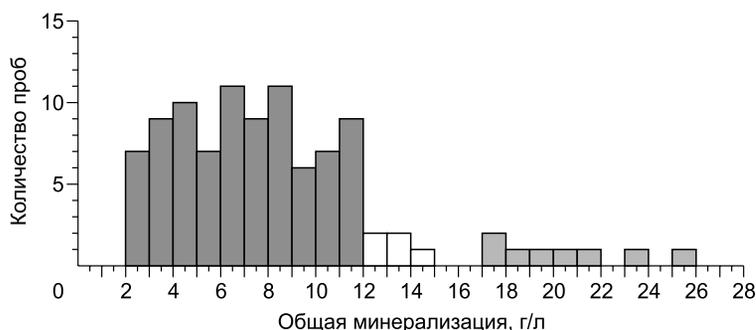
Полученные по скважинным данным закономерности использованы для перехода от геоэлектрических к литологическим разрезам, для выделения песчаных коллекторов на основе геоэлектрических разрезов.

Методика перехода от удельного электрического сопротивления (УЭС) к литологии заключается в следующем: полученные по данным МТЗ значения сопротивления в пределах каждой свиты сопоставляются с построенными для той же свиты гистограммами распределения сопротивления для разного типа пород. По гистограммам определяется наиболее вероятная литологическая разность, отвечающая полученному значению сопротивления. На гистограммах для некоторых свит есть участки «перекрывания» по сопротивлению, т.е. одному и тому же диапазону сопротивлений с одинаковой вероятностью могут отвечать разные типы пород, для таких значений сопротивления показывалось чередование пород одного и другого типа.

Таким образом, по каждой свите строятся литологические колонки вдоль профиля. Затем эти колонки переносятся уже на разрез с учетом геометрии, мощности слоев. Если свита имеет на некотором участке небольшую мощность, то литология на этом участке напрямую определяется по гистограмме. На участках с большой мощностью интервала небольшое изменение УЭС может быть связано уже не только с изменением литологии во всей толще свиты, но и с появлением линз, отдельных тел, прослоев с другой литологией. В таких случаях для литологического разреза используются колонки по ближайшим скважинам, если таких нет, то берется сейсмическая волновая картина или литологические разрезы по соседним профилям. Пример разреза, построенного с использованием описанного методического приема показан на рис. 6.

По полученным в каждой точке МТЗ геоэлектрическим моделям были построены карты удельного электрического сопротивления для каждого слоя (интервала) по западной части площади исследований. Для оценки перспектив нефтегазоносности на карты УЭС по каждой свите вынесены перспективные участки с разрезов и объединены в зоны согласно рисунку изолиний сопротивлений. Пример такой карты для суходудинского интервала показан на рис. 7.

Используя эти карты можно по результатам МТЗ выделить зоны для постановки более детальных работ и охарактеризовать по степени перспективности все выявленные сейсморазведочные объекты. Нужно отметить, что если по данным МТЗ сейсморазведочный объект не попадает в зону с хорошими коллекторскими свойствами, то это не значит, что там коллекторов быть не может. Во-первых, сеть профилей МТЗ редкая, на большей части территории исследований она в два раза реже сейсморазведочной. Во-вторых, результаты МТЗ носят интегральный характер, изучаются геоэлектрические свойства интервалов целиком. Повышение сопротивления в интервале в таком случае обозначает, что в нем увеличивается доля песчаников в отложениях и, соот-



**Рис. 5. Гистограммы распределения значений общей минерализации пластовых вод в юрско-меловых отложениях в пределах ЕХРП по скважинным данным.**

ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПРОГИБ

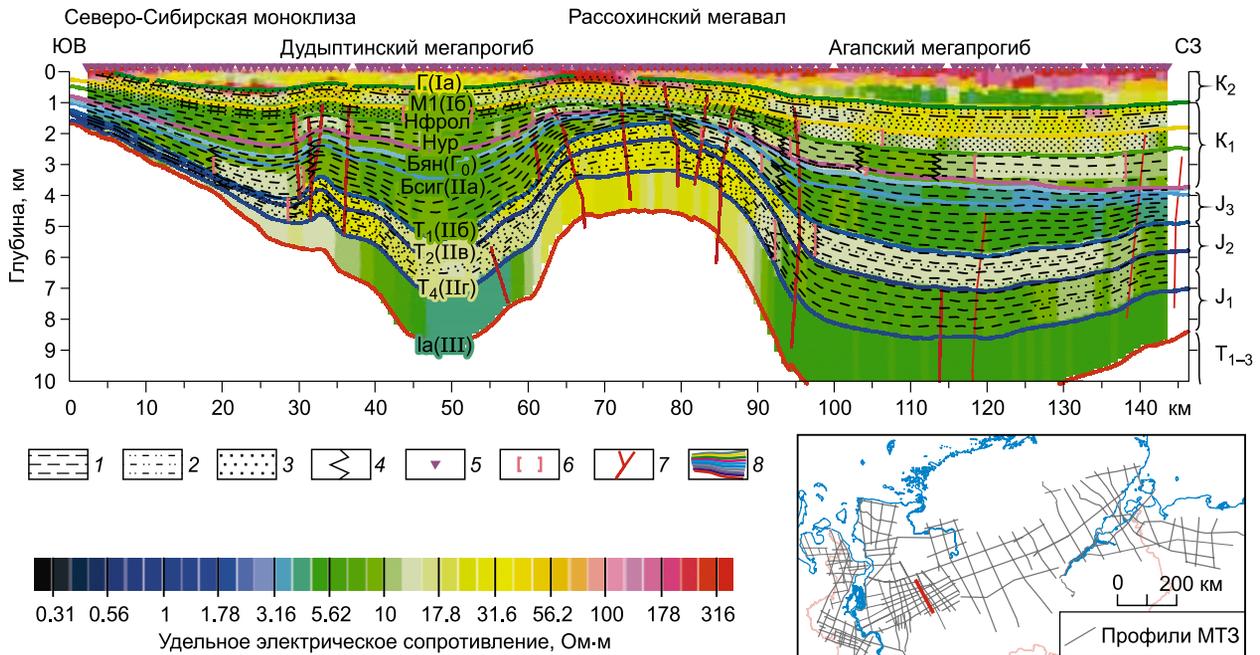


Рис. 6. Геолого-геофизический разрез юрско-меловых отложений.

Индексы сейсмических горизонтов: Г (1а) — кровля долганской свиты верхнего мела [K<sub>1-2</sub> dl], M<sub>1</sub>(1б) — кровля углисто-глинистой пачки нижнеяковлевской свиты нижнего мела, Нфрол — фроловская (ямбургская) глинистая пачка нижнего мела, Нур — урьевская глинистая пачка нижнего мела, Бян (Г<sub>0</sub>) — кровля волжско-берриасовых отложений [J<sub>3</sub>-K<sub>1</sub> gl], Бсиг (IIа) — кровля оксфорд-кимериджских отложений (сиговская свита) верхней юры [J<sub>3</sub> sg], T<sub>1</sub> (IIб) — кровля мальшевской свиты средней юры [J<sub>2</sub> ml], T<sub>2</sub> (IIв) — кровля вымской свиты средней юры [J<sub>2</sub> vm], T<sub>4</sub> (IIг) — кровля китер-бютской свиты нижней юры [J<sub>1</sub> kt], Ia (III) — поверхность разновозрастного доюрского основания.  
 1 — глины и аргиллиты, 2 — преимущественно алевролиты, 3 — пески и песчаники, 4 — границы литологически выдержанных отрезков, 5 — пикеты МТЗ, 6 — перспективные участки по данным МТЗ, 7 — разломы, 8 — сейсмические горизонты.

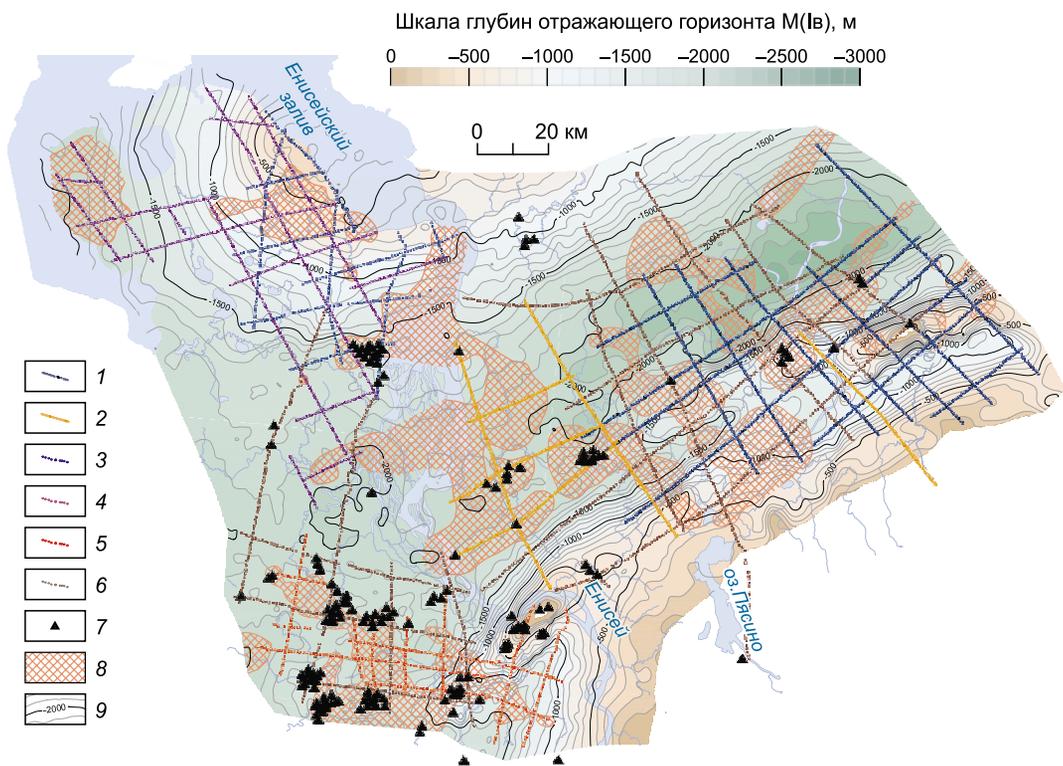


Рис. 7. Перспективные зоны в суходудинском интервале разреза по данным МТЗ.

Площади: 1 — Пясинская, 2 — Новотаймырская, 3 — Левобережная, 4 — Усть-Енисейская, 5 — Танамская, 6 — Танамо-Пясинская; 7 — скважины; 8 — перспективные зоны, по данным МТЗ; 9 — изолинии глубин (м) горизонта M(1в).

ответственно, увеличиваются перспективы с точки зрения наличия хороших коллекторов. Если коллектор есть, но его мощность по сравнению с остальной частью интервала незначительна, то он практически не повлияет на среднее значение сопротивления слоя. Таким образом, информация о перспективности объектов является их ранжированием и показывает, что они находятся в наиболее благоприятных условиях с точки зрения суммарных свойств соответствующего интервала.

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКОЙ ПАЛЕОЗОЙСКОГО КОМПЛЕКСА

**Горный Таймыр.** Палеозойский комплекс на территории исследований имеет сложное строение. Это касается не только Горного Таймыра, представляющего собой складчатый, сложнодислоцированный пояс, но и, как становится ясно по результатам проводимых в настоящее время геофизических работ, на территориях, где палеозойские отложения перекрыты мезокайнозойским чехлом [Афанасенков, 2016б]. Со складчатыми зонами сходного строения в мире связаны крупнейшие скопления нефти и газа [Соборнов, 2016]. Достаточно привести примеры Персидского залива и Венесуэлы, обладающих максимальными концентрациями нефтегазовых ресурсов в мире.

Очевидно, что комплексные геофизические исследования при изучении таких объектов дают неоспоримое преимущество. Использование электроразведки в комплексе с сейсморазведкой в складчато-надвиговых поясах, в условиях развития соляной тектоники, при изучении рифовых построек стало мировой практикой [Patro et al., 2005; Hudec, Jackson, 2007].

Результаты работ по профилю Диксон—оз. Хантайское и на Правобережной площади показали высокую эффективность комплексирования сейсморазведки, электроразведки и гравиразведки при изучении глубинного строения Горного Таймыра. Первый же сейсмический профиль, вышедший в западную часть Таймырской складчатой области, показал существование крупнейшего прогиба — Западно-Таймырского [Афанасенков и др., 2017а,б], в пределах которого мощность осадочного комплекса достигает 20 км [Кушнир, 2016]: порядка 10 км палеозойских отложений и столько же верхнерифейских (?). По своим масштабам эта депрессия сопоставима с расположенным южнее ЕХРП и отделяется от него Тарейским валом, также впервые выделенным в рамках исследований по маршруту Диксон—оз. Хантайское.

По результатам тех работ выделен ряд крупных перспективных объектов в палеозойских отложениях: соляно-купольные объекты (рис. 8) и карбонатные массивы [Кушнир, 2016]. Максимальная результативность интерпретации геофизических данных была достигнута за счет комплексирования, поскольку сами по себе сейсморазведочные и электроразведочные данные ввиду значительной расчлененности геологического разреза с трудом поддавались толкованию.

Намеченные в процессе сопоставления сейсморазведочных, электроразведочных и других геофизических данных по профилю Диксон—оз. Хантайское карбонатные постройки, соляно-купольные тела и прочие литологические особенности, как оказалось, группируются в линейные зоны большой протяженности, простирающиеся контролируются палеограницами седиментационного бассейна и областью развития Таймырской надвиговой системы (рис. 9).

По итогам работ на западе Горного Таймыра, исходя из весьма значительной протяженности структур (на сотни километров) и связанных с ними прогнозируемых литологических особенностей разреза, рекомендовано выделение нового, возможно нефтегазоносного, района.

Дополнительную надежность сделанным выводам придают результаты специально проведенных маршрутных геолого-геохимических исследований, которые показали, что в палеозойском разрезе на западе Таймырской складчатой области прогнозируется широкое развитие нефтегазопроизводящих пород со значительным генерационным потенциалом. При этом степень катагенетической преобразования органического вещества свидетельствует, что ряд комплексов прошли главную фазу нефтеобразования, в то время как другие, вероятно, и сегодня продолжают генерировать углеводороды (особенно это касается непосредственного сочленения Горного Таймыра и Енисей-Хатангского прогиба, где палеозойские отложения, по всей видимости, испытали максимальное погружение только в меловое время).

Западная часть Горного Таймыра имеет уникально сложное геологическое строение, в котором принимают участие образования фундамента, осадочные толщи от рифейского до мезозойского возрастов, которые осложнены надвиговой системой, трапповым магматизмом, соляной тектоникой и рифовыми постройками. При этом она является плацдармом на территории Горного Таймыра, где впервые проведен полный комплекс систематических геолого-геофизических и геохимических исследований. Метод МТЗ занимает свое весомое место в комплексе геофизических методов, применяемых для изучения Горного Таймыра. В данном случае результаты МТЗ позволили выполнить обобщенный литологический прогноз фанерозойского разреза, наметить наличие соляных диапиров, показать предполагаемые зоны развития рифов, вероятную приуроченность основных разломных поверхностей уточнить положение подошвы трапповой толщи и юрско-меловых отложений, выделить «слепые» интрузивные тела в верхней части разреза (рис. 10).

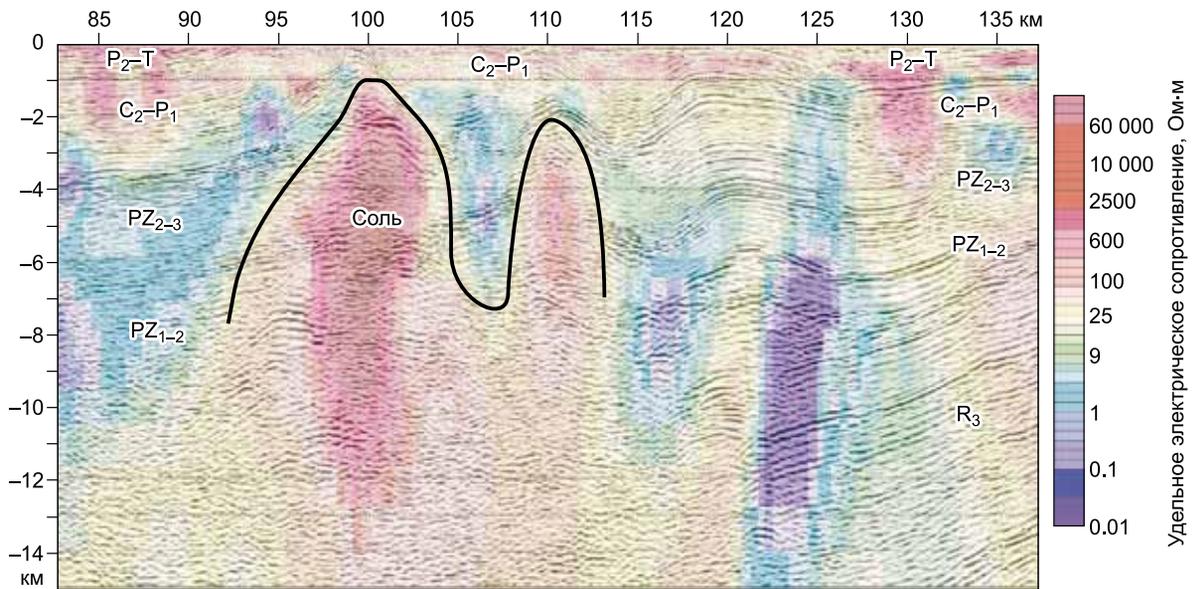


Рис. 8. Сопоставление сейсмического волнового поля с геоэлектрическим разрезом в районе развития соляной тектоники.

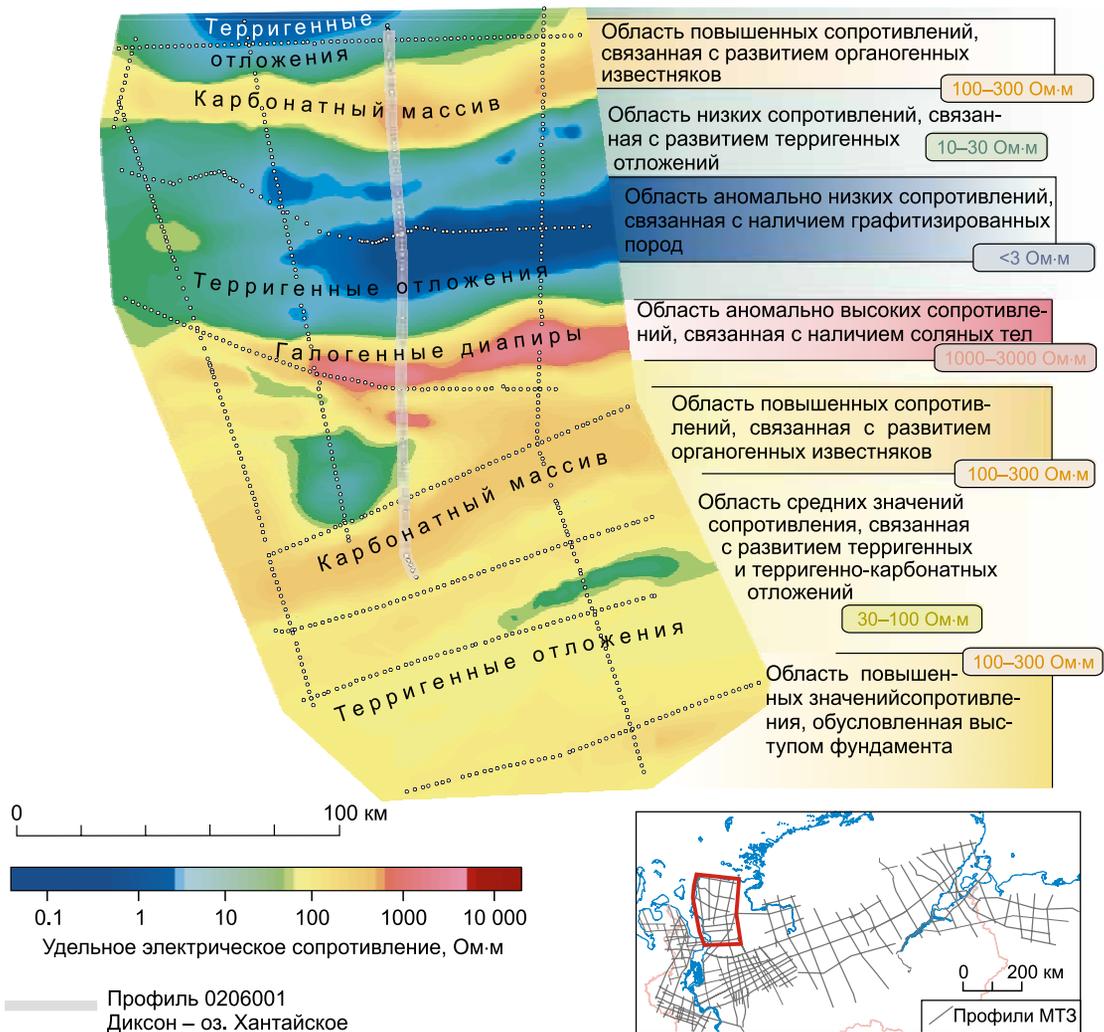
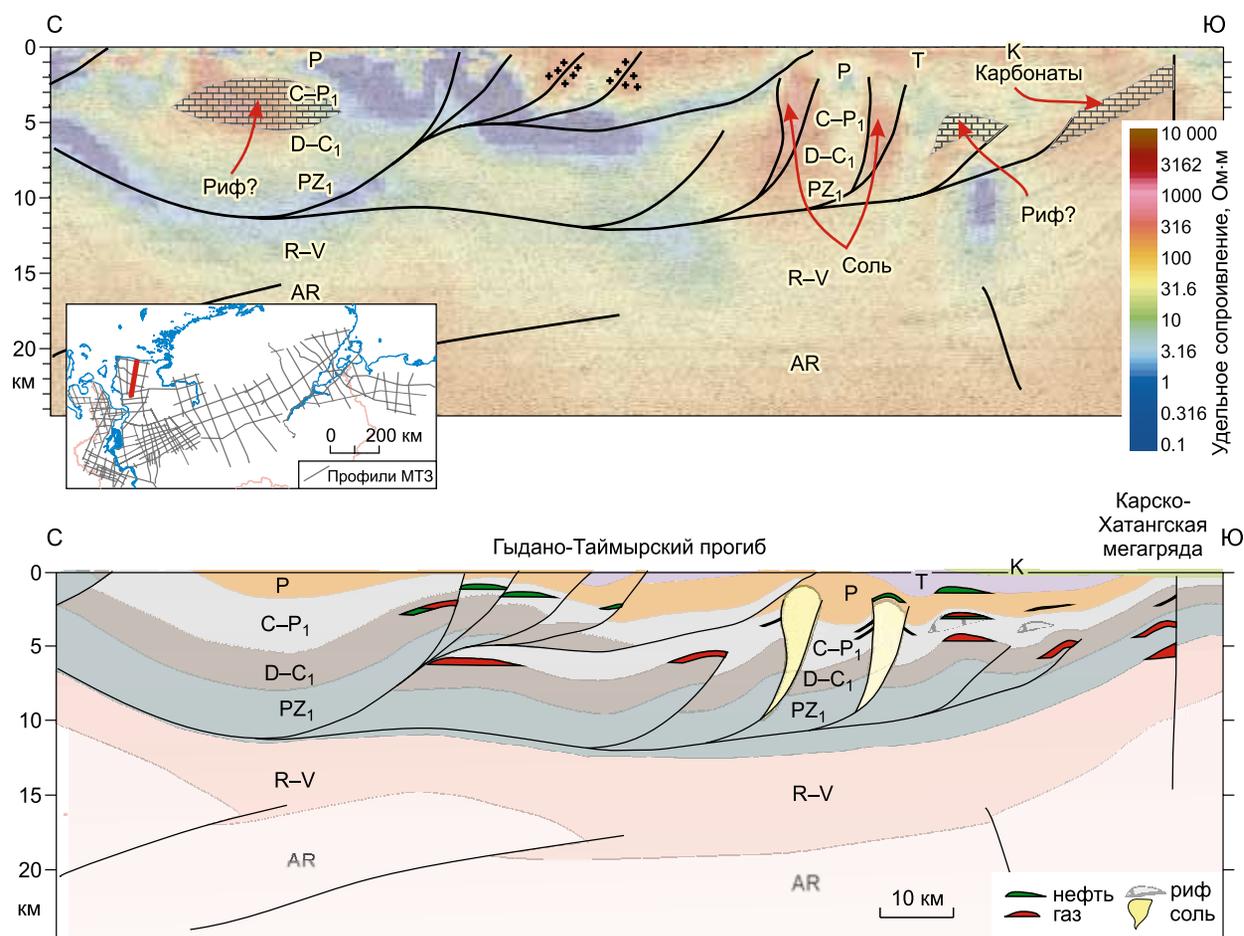


Рис. 9. Карта УЭС на глубине 4 км западной части Горного Таймыра (Правобережная площадь) с элементами геологического районирования, выполненного по результатам комплексной интерпретации геофизических данных.

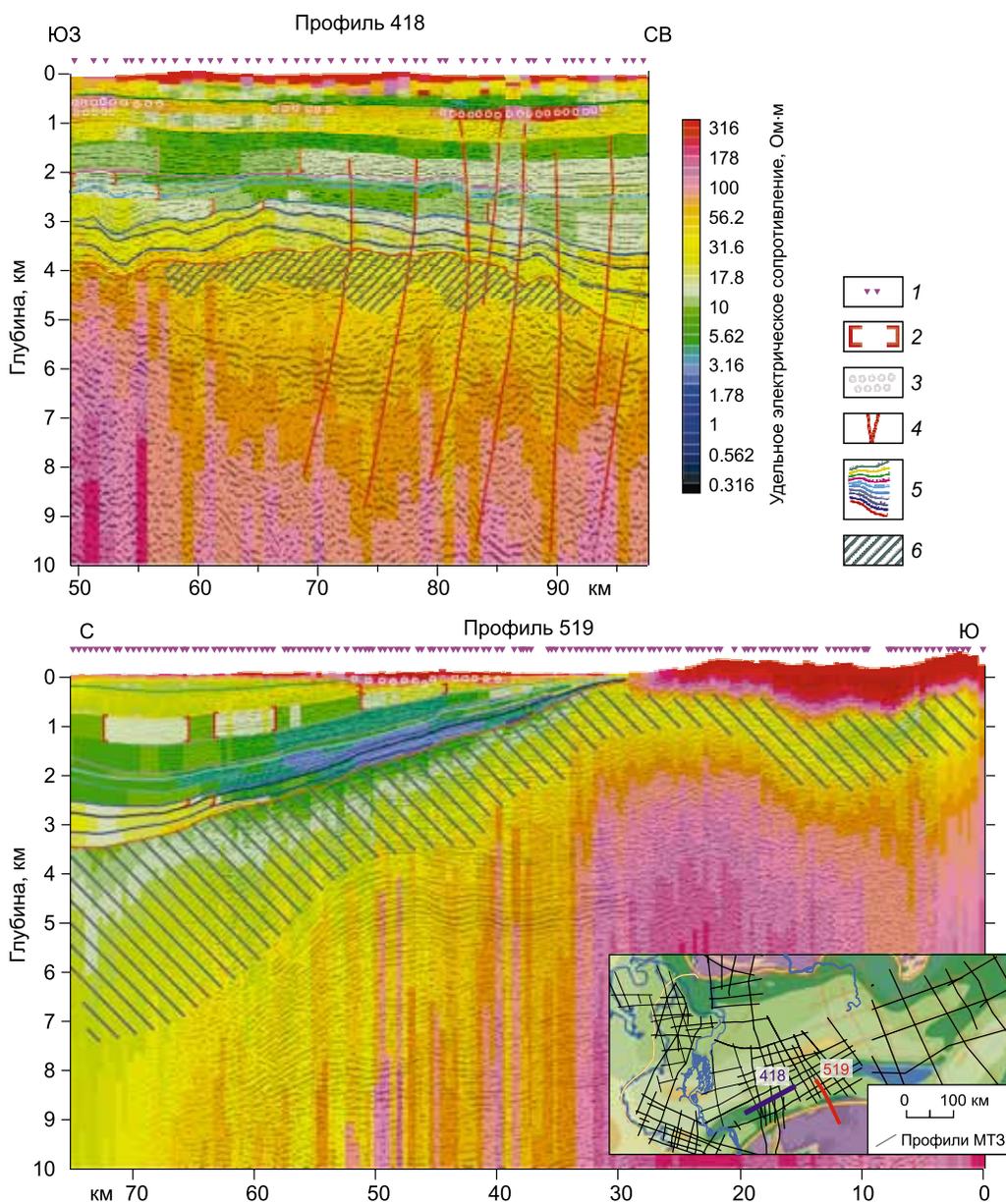


**Рис. 10. Сейсмический разрез 0206001 складчатого Таймыра с наложением данных МТЗ, позволяющих существенно уточнить детали геологического строения, по [Соборнов, 2016].**

**Северо-Сибирская моноклиза.** На южном борту ЕХРП в доюрском уровне разреза выделяются зоны среднего и пониженного сопротивления, которые могут быть перспективными на наличие коллекторов. Юрско-меловой чехол является в данном случае покрывкой, поэтому объекты в нижележащих отложениях даже со скромными коллекторскими свойствами при большой их мощности и площади распространения могут быть весьма перспективными. К сожалению, для этого уровня разреза скважинных данных практически нет, что не позволяет увязать сопротивление с литологией этих отложений. Тем не менее, исходя из общих соображений, понижение сопротивления говорит о наличии флюидонасыщения, что, в свою очередь, свидетельствует о повышенной проницаемости и пористости пород. И наоборот — участки с высоким сопротивлением (которое связано, вероятно, с магматическими или метаморфическими процессами) не могут рассматриваться как перспективные на наличие коллекторов. На рис. 11 на двух типичных геоэлектрических разрезах зеленой штриховкой показаны прогнозируемые по данным МТЗ зоны с благоприятными коллекторскими свойствами в доюрском уровне разреза.

На профиле 519 в палеозойских отложениях выделяется яркий проводящий слой, в южной части перекрытый высокоомными пермотриасовыми вулканогенно-осадочными породами, выходящими на поверхность, а севернее — мезозойскими проводящими терригенными отложениями. В палеозойской части разреза проводящие интервалы рассматриваются как перспективные зоны с повышенной пористостью, трещиноватостью, проницаемостью. Под южной границей распространения мезозойских отложений по данным МТЗ выделяется высокоамплитудное палеозойское поднятие, которое с учетом наличия слоя с хорошими коллекторскими свойствами является перспективным.

При наложении на этот разрез волновой сейсмической картины, видно, что причиной отсутствия прослеживаемых горизонтов в южной части профиля является высокоомный приповерхностный слой — пермотриасовые траппы. Как только высокоомный слой выклинивается (размывается) — появляется прослеживаемость сейсмических горизонтов. Но гораздо интереснее палеозойский вал на 50-м км про-

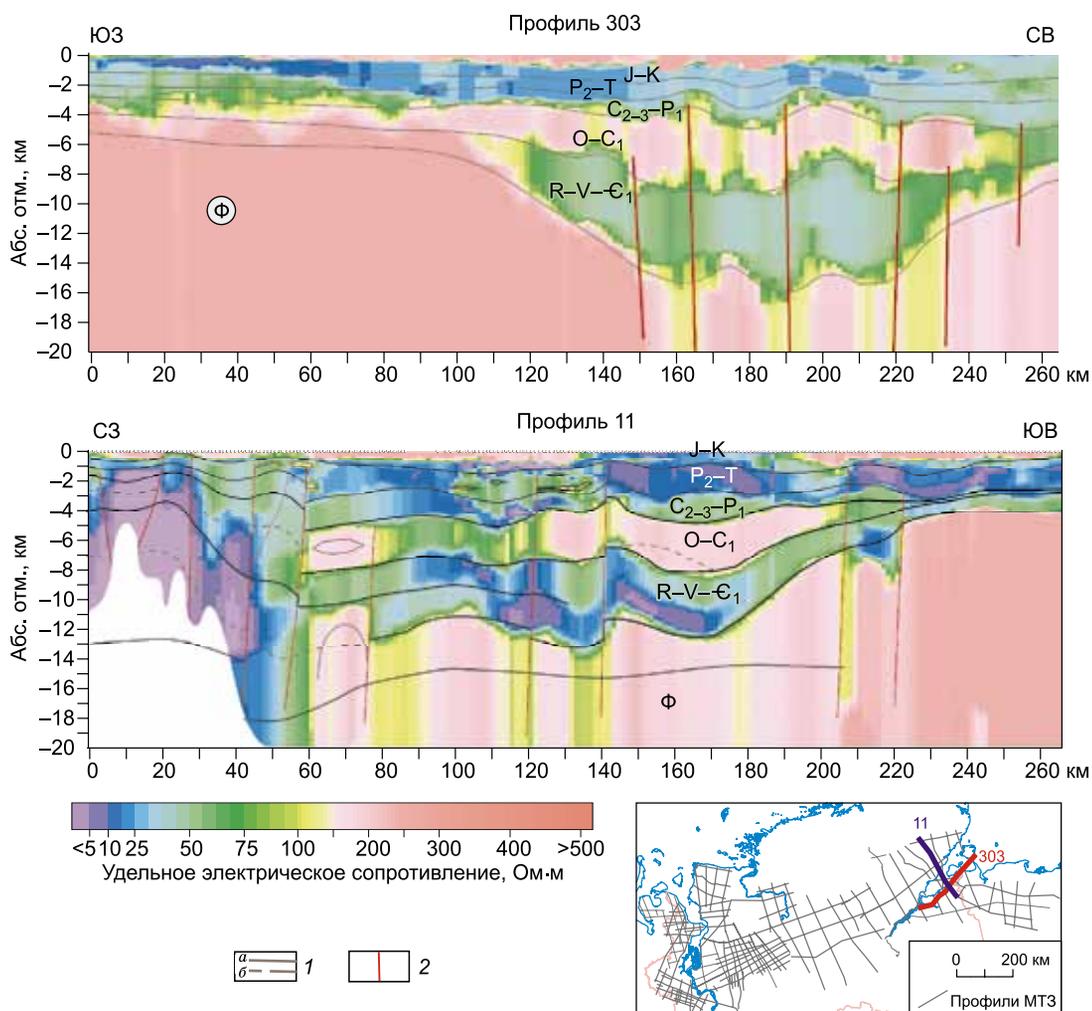


**Рис. 11. Зоны улучшенных коллекторских свойств в доюрском уровне разрезов на Северо-Сибирской моноклизе.**

1 — пикеты МТЗ; 2 — перспективные участки, по данным МТЗ; 3 — подмерзлотные аномалии повышенного сопротивления; 4 — разломы; 5 — сейсмические горизонты; 6 — интервал с улучшенными коллекторскими свойствами в палеозое.

филя 519, в верхней части которого отложения имеют пониженные сопротивления и, соответственно, улучшенные коллекторские свойства, который перекрыт низкоомными глинистыми юрскими отложениями, и выше выделяется подмерзлотная аномалия повышенного сопротивления — признак наличия УВ в более глубоких горизонтах. Таким образом, это поднятие является весьма перспективным по комплексу признаков.

**Анабаро-Хатангская седловина.** На востоке территории исследований перспективы нефтегазонасности связаны в первую очередь с палеозойским комплексом пород [Девятов, Савченко, 2012]. Очевидно, что в сложнопостроенном палеозойском комплексе в данном районе электроразведка показывает весьма высокую информативность. Видны как региональные особенности глубинного строения (поднятия, фундаменты, моноклизы, прогибы, крупные валы, зоны смятия), так и локальные объекты (поднятия, положительные и отрицательные структуры, отдельные разломы). Использование результатов электроразведки в комплексе других методов изучения глубинного геологического строения позволяет



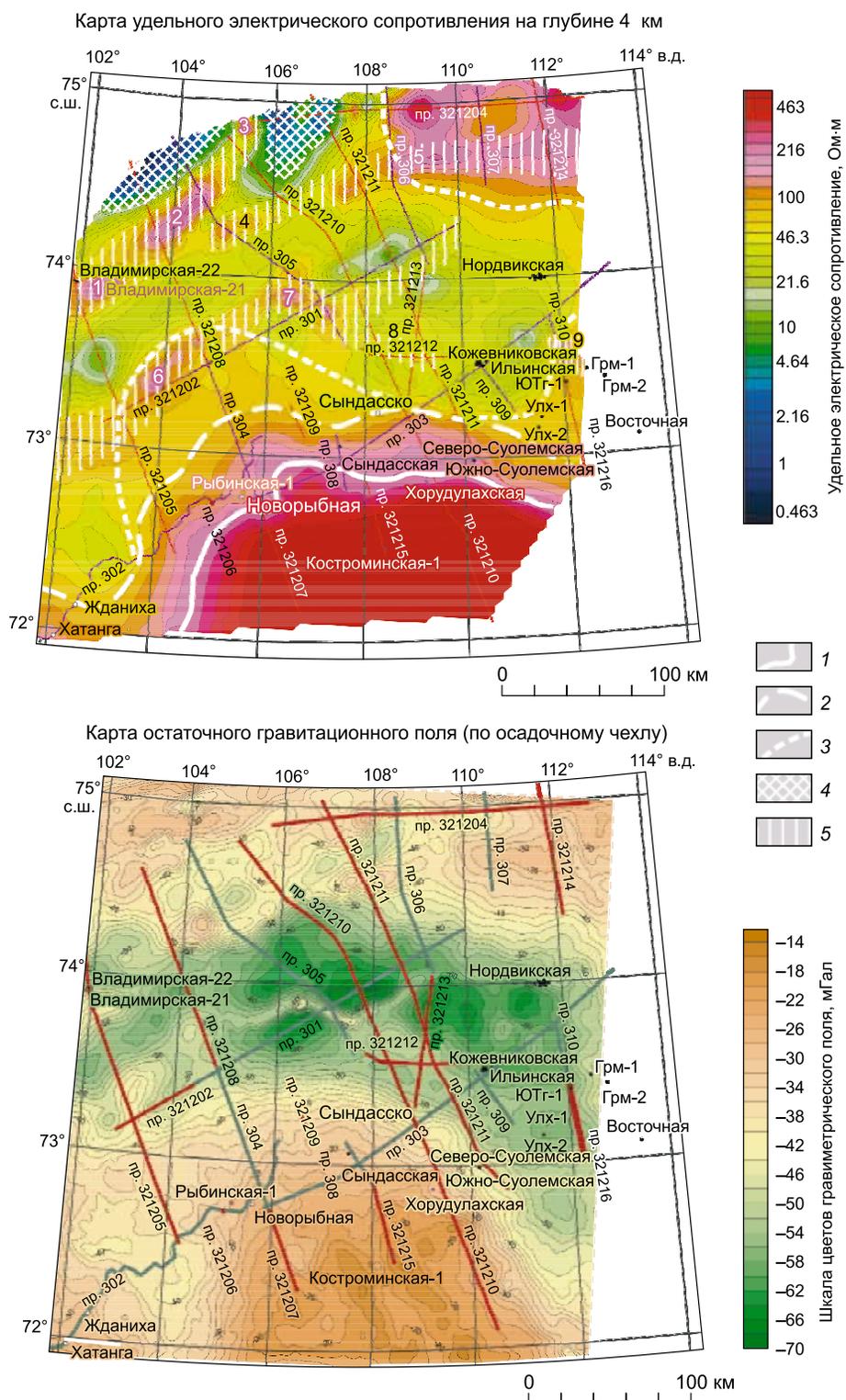
**Рис. 12. Глубинные геоэлектрические разрезы по профилям 11 и 303 на востоке территории исследований, по [Махнач, 2014].**

*1* — границы геоэлектрических горизонтов: уверенные (*a*), предполагаемые (*b*); 2 — тектонические нарушения по данным электроразведки.

сузить неоднозначность геологической интерпретации. Особенно это касается областей развития соляных диапиров [Hudec, Jackson, 2007], сдвигово-надвиговых структур, в том числе и в пределах Хатангского залива.

В центральной части Хатангской впадины и, фрагментами, в западной, юго-западной частях по данным электроразведки картируются рифейские прогибы, выполненные проводящими отложениями мощностью до 5 км (рис. 12). Оценка мощности по данным электроразведки выполнена только для верхней терригенно-карбонатной части рифей-вендского комплекса, которая имеет отображение в электрическом поле. Ниже нее прогнозируется развитие на значительную глубину рифейских карбонатных отложений, а суммарная мощность венд-рифейских отложений в наиболее погруженных участках оценивается около 8—10 км [Пронкин и др., 2014]. Наличие этих толщ рассматривается в качестве источника рассеянного органического вещества, миграция флюидов из которого может осуществляться по латерали в бортовые части прогиба и вертикально по разломам в пределы положительных структур. В районе Таймырской складчатой области по данным электроразведки картируются обширные проводящие зоны, приуроченные к кровле венд-рифейского комплекса и имеющие развитие на глубину, точно оценить которую сложно из-за ограниченной глубины исследования. Такая аномальная проводимость свидетельствует о наличии глинистых и углеродистых отложений, их преобразовании в складчато-надвиговой зоне. Надвиги могли способствовать отжатию и миграции УВ в сторону Хатангской впадины.

По аналогии с представлением результатов по западной части Горного Таймыра для Хатангского района были составлены карты-срезы удельного электрического сопротивления на различных глубинах.



**Рис. 13. Сопоставление карт УЭС на глубине 4 км с картой остаточного гравитационного поля, по [Савченко, 2014] в районе Анабаро-Хатангской седловины.**

1 — контур Анабарской антеклизы, 2 — контур Северо-Сибирской моноклинали, 3 — контур уступов (террас) фундамента, 4 — аномально проводящие области Южно-Таймырской тектонической зоны, 5 — протяженные высокоомные зоны, совпадающие с осями крупных валов: 1 — Владимирский, 2 — Киряко-Тасский, 3 — Тулай-Кирякский, 4 — Осиповский вал, 5 — Журавлинный, 6 — Балахнинский, 7 — Сопочный, 8 — Кожевниковский, 9 — Тигянский.

Несмотря на то, что эти карты секут разновозрастные образования, они позволяют составить общее представление о региональном геоэлектрическом строении территории.

На рис. 13 представлена карта-срез на глубине 4 км. На ней видны крупные элементы районирования территории. Для сопоставления с результатами гравиразведочных работ ниже приведена карта остаточного гравитационного поля. Обе карты согласуются между собой настолько, насколько это позволяет редкая сеть профилей МТЗ.

Представленные материалы показывают, что, используя только разрезы и карты по данным МТЗ и данные гравиразведки, на региональном этапе можно проводить как районирование территории (выделение крупных тектонических элементов), так и выделение структур и элементов второго порядка (валы, поднятия и прочее). Очевидно, что комплексный подход позволяет повысить геологическую отдачу геофизических методов, где важное место на региональном этапе изучения глубинного строения занимает электроразведка.

### ГЛУБИННЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Зона распространения крупных линейных валобразных структур не ограничивается Складчатым Таймыром. Последние результаты геофизических исследований показывают, что они прослеживаются и в основании ЕХРП. Данный вопрос имеет не только важное научное значение, но и большую практическую значимость, так как в большой мере определяет условия формирования скоплений нефти и газа.

Изучение палеозойских отложений электроразведкой в ЕХРП затруднено из-за большой мощности перекрывающих их проводящих мезозойских отложений, экранирующих нижележащие слои. Для изучения глубинного строения земной коры требуются специальные длительные измерения. Отметим, что метод МТЗ является одним из основных при изучении глубинного строения земной коры [Bedrosian, 2007].

В рамках работ на Танамо-Пясинской площади (западная часть ЕХРП) были выполнены глубинные МТЗ — точки МТЗ с длительностью записи 2 сут. Такие же наблюдения выполнялись по профилю 622, расположенному в центральной части Таймыра (северное продолжение профиля 3-СБ «Алтай—Северная Земля») (см. рис. 1).

Глубинные геоэлектрические разрезы по профилям 209-109-120 и 622 представлены на рис. 14. Стоит отметить, что геоэлектрические разрезы построены независимо, только по данным МТЗ. Над ними показана интерпретация временного сейсмического разреза по параллельному профилю Диксон — оз. Хантайское, расположенному в 20—30 км к западу от профиля 209-109-120.

Очевидно высокое сходство геологических объектов, выделяемых на верхних двух разрезах. Также очевидна и взаимодополняемость результатов двух методов: ясные геометрические образы слоев, антиклиналей и синклиналей в местах потери сейсмической корреляции достраиваются тектоническими зонами, которые по электроразведке выделяются понижением сопротивления. Чрезвычайно низкими сопротивлениями отмечаются зоны угленосных толщ со значительной графитизацией.

Ниже геоэлектрического разреза по маршруту 209-109-120 представлен разрез по профилю 622. Несмотря на то, что электроразведочные профили отстоят друг от друга почти на 250 км, на них явно выделяются общие элементы глубинного строения. Конечно же, к ним относятся проводящие терригенные отложения, заполняющие ЕХРП. Максимальная мощность этих отложений составляет около 8 км. Под северным крылом ЕХРП (Южно-Таймырская моноклинали) выделяется череда высокоомных блоков, разделенных узкими зонами пониженных сопротивлений, падающих под различными углами на север. Аналогичное блоковое строение наблюдается и на композитном маршруте в пределах южной части Складчатого Таймыра. Это позволяет предположить, что сложнодислоцированное надвиговое строение имеют не только структуры Складчатого Таймыра, но и разновозрастные образования под ЕХРП.

В южной части ЕХРП выделяется высокоомный купол Рассохинского вала. На обоих разрезах этот вал ограничен с севера и юга проводящими встречно падающими относительно узкими зонами, очевидно, тектонического происхождения. Такая картина может свидетельствовать в пользу сдвиговой природы цепочки валов, образующих Обско-Лаптевскую мегагряду.

### ИЗУЧЕНИЕ ЗОНЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Изучение зоны многолетнемерзлых пород (ММП) имеет важное практическое значение как с инженерно-геологической точки зрения, так и с точки зрения изучения нефтегазоносности при региональных геолого-геофизических работах.

На большей части территории исследований верхняя часть разреза сложена терригенными пологозалегающими юрско-меловыми отложениями. С геоэлектрической точки зрения, этот комплекс пород можно охарактеризовать как проводящий, удельное электрическое сопротивление (УЭС) юрско-меловых пород колеблется от первых до десятков Ом·м. Высокая проводимость в этом интервале разреза



обусловлена содержащейся водой в породах при их высокой эффективной пористости. В этих условиях замерзание этой воды в зоне распространения мерзлоты приводит к многократному повышению УЭС пород. Поэтому выявление пород в мерзлом состоянии — благоприятная задача для электроразведки.

На всех геоэлектрических разрезах в регионе исследований верхние несколько сот метров имеют высокое сопротивление: от 100 до 1000 Ом·м. Мощность этого высокоомного слоя весьма неоднородна и меняется от 150 до 600, а местами и до 1000 м. Этот слой отвечает породам в мерзлом состоянии. На рис. 15 показан характерный геоэлектрический разрез по данным МТЗ до глубины 2 км по профилю субширотного простирания в западной части ЕХРП. Разрез построен по результатам простой автоматической одномерной инверсии средних кривых МТЗ. Мощность высокоомного слоя, отвечающего мерзлым породам, на этом профиле меняется с 50 м в районе р. Енисей до 500 м на востоке профиля.

По результатам измерений в скважинах мощность криолитозоны в западной части ЕХРП составляет 450—600 м. 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 [Якушев, 2009]. Заметим, что термометрию зачастую проводят в неустоявшихся скважинах. В таких случаях получить абсолютные значения температур невозможно. Поэтому криолитозону в таких скважинах выделяют по нулевому или слабому градиенту на температурной кривой. Мощности ММП и криолитозоны могут существенно различаться не только из-за высокой минерализации поровых растворов, но и например из-за наличия в глинистых породах связанной воды, которая замерзает при более низкой температуре. Например, на Пайяхском месторождении мощность криолитозоны по показаниям термозонда около 500 м. В то же время каротаж сопротивлений и результаты МТЗ показывают, что непосредственно в мерзлом состоянии находятся породы в верхних 200 м разреза, где сопротивление превышает 100 Ом·м (рис. 16). Глубже породы существенно глинистые, в них содержится связанная вода, которая, несмотря на отрицательные температуры, не замерзла. Сопротивление этих пород относительно низкое — 10—30 Ом·м.

Возвращаясь к рис. 15 отметим, что в центральной части ЕХРП в районе Джангодских, Среднепясинских и Рассохинской скважин мощность верхнего высокоомного слоя совпадает с мощностью криолитозоны по результатам скважинных наблюдений. На западе, в районе Енисея и на его левом берегу мощность пород в мерзлом состоянии по данным МТЗ, сокращается до 50—100 м. И в центральной, и в западной части ЕХРП сопротивление верхней части разреза, по данным МТЗ и по каротажу, в скважинах совпадает. По тем же скважинным данным известно, что минерализация воды в породах в этом интервале разреза невысокая — 7—10 г/л. Также известно, что на западе ЕХРП верхняя часть разреза представлена в основном глинистыми отложениями. Этим и объясняется сокращение глубины промерзания пород. На востоке, где разрез более песчаный и объем связанной воды в породах существенно меньше, мощность мерзлых пород совпадает с мощностью криолитозоны.

С практической точки зрения для инженерно-геологических задач, а также для учета влияния ВЧР на сейсморазведку, информация о мощности мерзлых пород, возможно, даже более ценна, чем о мощности криолитозоны в целом.

На основе геоэлектрических разрезов по всем профилям последних лет была построена карта мощности мерзлых пород по данным МТЗ. Объем имеющихся фактических данных большой, но при этом неравномерный. Для запада территории он позволяет построить карту м-ба 1:200 000, на востоке — 1:500 000, в центре — 1:1 000 000. По всей исследуемой территории построена карта м-ба 1:1 000 000 (рис. 17).

На востоке изучаемой территории впервые получены очень ценные данные о мощности ММП в районе Хатангского залива. Часть профилей МТЗ прошла непосредственно через залив, измерения проводились со льда. Мощность ММП в заливе в настоящее время имеет важнейший практический интерес для проведения начатых здесь буровых работ. Для постановки буровой платформы в Хатангском заливе крайне важна информация о наличии мерзлоты.

На рис. 18 представлен геоэлектрический разрез по данным МТЗ верхних 1.5 км по отрезку профиля 10, пересекающему Хатангский залив. Шаг МТЗ по профилю — 1 км. Разрез построен по результатам автоматической одномерной инверсии средних кривых МТЗ. Как видно на разрезе, в сухопутной части профиля мощность ММП составляет около 500 м. При приближении к берегу наблюдаются зоны понижения сопротивления, связанные, по-видимому, с таликами. 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 около 350—400 м и проявлен на разрезе более низкими сопротивлениями, чем на суше — 30—100 Ом·м.

Этот пример показывает 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 крайне важной практической задачей.

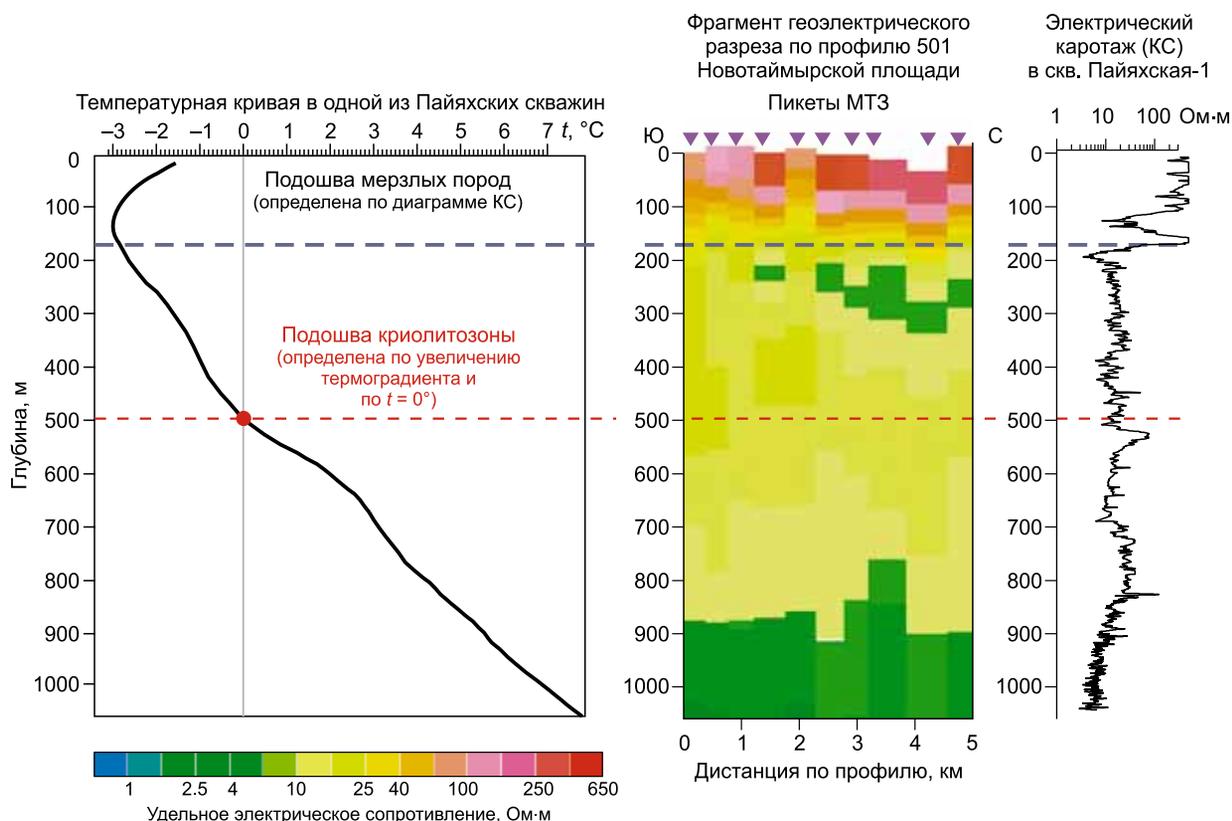


Рис. 16. Положение подошвы мерзлых пород и криолитозоны в районе Пайяхского месторождения.

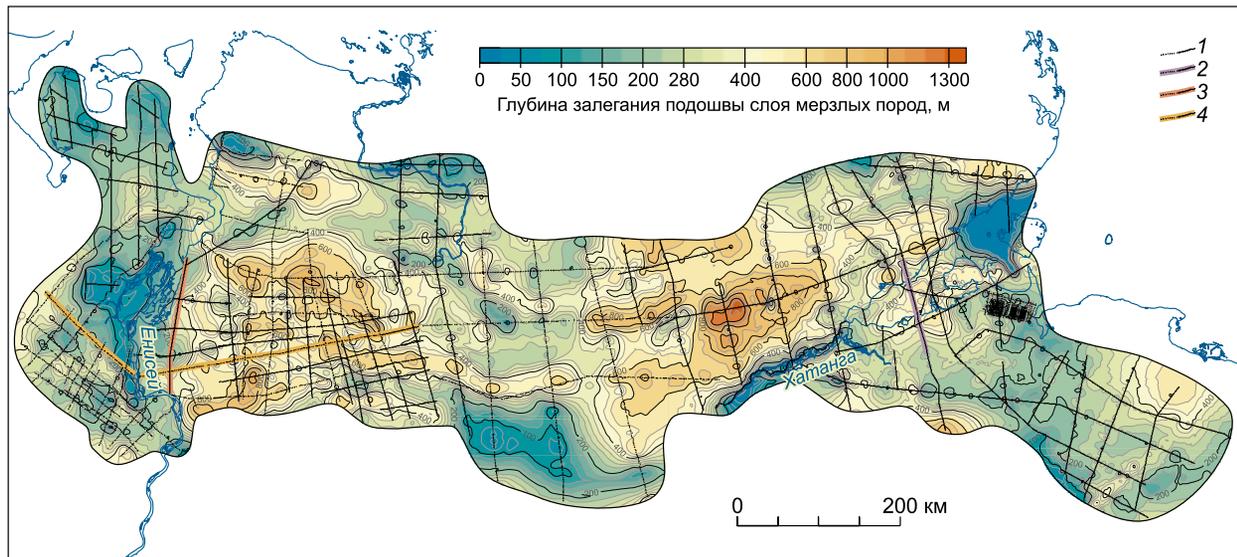


Рис. 17. Карта мощности мерзлых пород по данным МТЗ.

1 — пикеты МТЗ; 2 — профиль 10 Анабаро-Хатангской площади 2010—2012 гг.; 3 — профиль 501 Новотаймырской площади 2014—2015 гг.; 4 — профили 102 и 112-412 Тимано-Пясинской (2008—2010 гг.) и Пясинской (2012—2014 гг.) площадей.

Изучение верхней части разреза электроразведкой полезно и с точки зрения изучения нефтегазонасыщенности. В 2015 г. работы МТЗ на западе изучаемой территории впервые проводились с шагом 500 м по профилю, а сами профили проходили через известные месторождения. В процессе интерпретации полученных электроразведочных данных была выявлена закономерность: над известными месторожде-

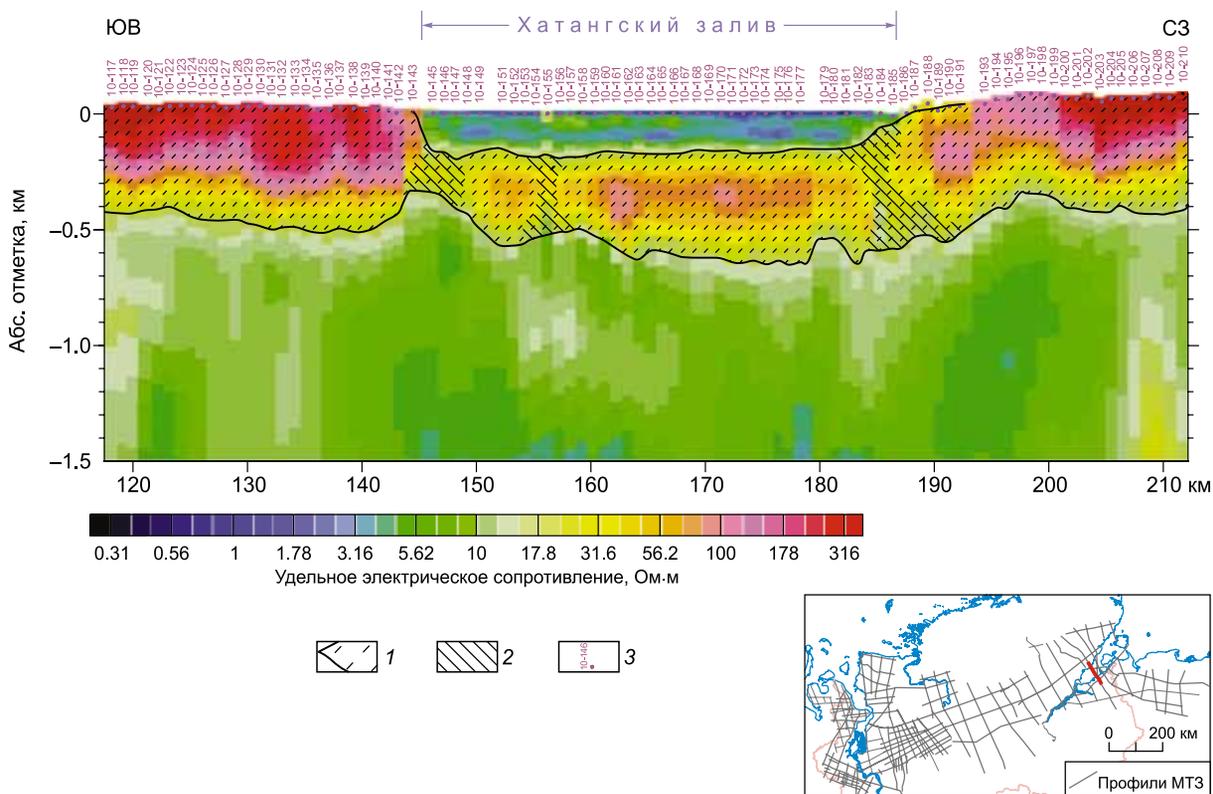


Рис. 18. Геоэлектрический разрез верхних 4 км по профилю через Хатангский залив (МТЗ проводились со льда).

1 — слой многолетнемерзлых пород, 2 — зоны протаивания, 3 — пикеты МТЗ на разрезе и их номера.

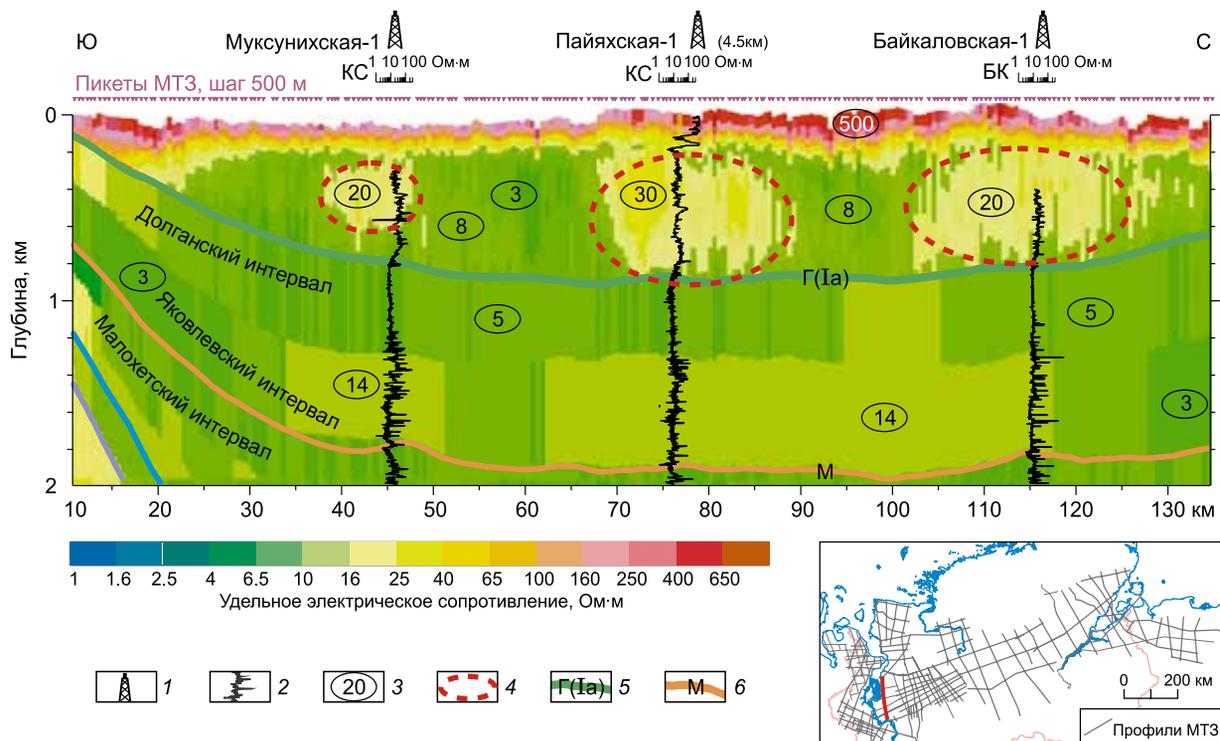


Рис. 19. Геоэлектрический разрез верхних 2 км по профилю 501 на западе ЕХРП.

1 — скважины глубокого бурения; 2 — картаж сопротивления в скважинах; 3 — среднее значение сопротивления (Ом · м); 4 — подмерзлотные аномалии повышенного сопротивления. Сейсмические горизонты и их индексы: 5 — кровля долганской свиты верхнего мела, 6 — кровля нейтинской (кошайской) глинистой пачки нижнего мела.

ниями в верхней части разреза на глубинах 300—800 м под слоем многолетнемерзлых пород (ММП) присутствуют **аномальные зоны повышенного сопротивления** [Афанасенков и др., 2016а].

На рис. 19 показан 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. В данном случае наиболее вероятным объяснением этих аномалий являются скопления газогидратов. Именно на глубинах 300—800 м расположена зона стабильности газогидратов (ЗСГ) при данных *PT*-условиях. Механизм образования скоплений газогидратов на этих глубинах описан во многих работах [Макагон, 2010; Сивцев, Рожин, 2011]. В некоторых работах [Якушев, 2009] отмечается наличие промежуточной зоны между многолетнемерзлыми породами и зоной скопления газогидратов. На представленном разрезе эта промежуточная зона фиксируется понижением сопротивления на глубинах 200—300 м.

Наличие подобных подмерзлотных аномалий повышенного сопротивления можно воспринимать как один из поисковых признаков скоплений УВ на глубине, который может использоваться при решении следующих задач.

**Прогноз 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.

**Определение контуров залежей.** В зонах с субгоризонтальным залеганием пластов и отсутствием в разрезе экранов и сложной тектоники миграция происходит в основном в вертикальном направлении. Поэтому можно сделать предположение о связи размеров аномалий и контуров скоплений УВ на глубине.

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

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В настоящее время на северном обрамлении Сибирской платформы активно идут работы нового этапа региональных комплексных работ методами МОГТ и МТЗ, ориентированных на подготовку к лицензированию высокоперспективных на УВ, но еще слабо изученных земель, большая часть которых до сих пор остается нераспределенной.

Максимальная результативность интерпретации геофизических данных в исследуемом регионе достигается за счет комплексирования. Полученные результаты комплексных исследований обеспечили значительный прирост геологической информации. В том числе, эта информация позволила радикально пересмотреть перспективы западной части Таймырской складчатой области и обосновать новое направление геолого-разведочных работ на севере Красноярского края.

Весомое место в комплексе геофизических методов занимает электроразведка. Основные задачи, которые может решать современная электроразведка в пределах северного обрамления Сибирской платформы:

1. При изучении мезозойских отложений в комплексе с сейсморазведкой и бурением электроразведка позволяет строить схемы и разрезы региональных литологических особенностей, а также прогнозные карты развития коллекторов и флюидоупоров.

2. Изучение строения, литологических особенностей и тектоники в палеозойском комплексе разреза. В тех зонах региона исследований, где палеозойские отложения находятся на достижимых для бурения глубинах, электроразведка по информативности при изучении сложностроенного палеозойского комплекса сопоставима с сейсморазведкой. Поэтому комплексирование этих методов, наряду с гравиразведкой, позволяет многократно увеличить геологическую результативность геофизических работ.

3. Решение глубинных задач: изучение зон сочленения крупных геоблоков, строения земной коры и верхней мантии, крупных тектонических зон.

4. Изучение многолетнемерзлых пород и подмерзлотных скоплений УВ.

Роль электроразведки и решаемые ею задачи на различных стадиях исследований представлены в таблице.

Опыт применения электроразведки методом МТЗ на Таймыре позволяет также сформулировать рекомендации по ее применению в будущем на новых объектах.

1. На первой стадии региональных исследований, при построении опорного каркаса геофизических профилей, когда решаются задачи по выявлению крупных перспективных зон для постановки более детальных работ, шаг между точками МТЗ по профилям должен составлять 1 км. Выявления отдельных объектов на этой стадии не требуется. Поэтому сгущать шаг между точками МТЗ до 500 м

**Место электроразведки в исследовании новых районов и подготовки объектов под поисковое бурение**

Стадия/метод	Потенциальные поля, дистанционные методы	Сейсморазведка	Электроразведка, решаемые задачи	Геохимия	Инженерия	Экологические исследования
Первичная оценка	+	+	Изучение глубинного строения, выявление крупных структур	—	—	—
Структурный план, стратификация	+	+	Определение вещественного состава пород, структурный план в неблагоприятных для сейсмоки районах	—	—	—
УВ-насыщение, фазовый состав	—	+	Определение фазового состава при благоприятных условиях, УВ-насыщения по вторичным признакам	+	—	—
Оценка ресурсов	—	+	Определение коллекторских свойств в целевых интервалах	—	—	—
Инженерная подготовка	—	+	Изучение ВЧР, в т.ч. криолитозоны	—	+	—
Оценка воздействия на окружающую среду	—	—	—	+	—	+

нецелесообразно. Большой шаг по профилям приводит к потере информативности и «устойчивости» получаемых результатов. Это показывает опыт работ 2007—2009 гг. на первых площадях нового этапа.

На второй стадии региональных исследований стоит задача оконтуривания крупных перспективных зон и выделение отдельных участков и объектов с целью их подготовки под лицензирование, постановку параметрических скважин и более детальных геофизических работ. Для решения этих задач, в свете последних результатов, рекомендуется использовать шаг по профилю 500 м между точками МТЗ.

2. В таких сложнопостроенных складчатых поясах, как Горный Таймыр, со сложными сейсмогеологическими условиями электроразведка по информативности становится сопоставима с сейсморазведкой, а их совместное использование и привлечение данных потенциальных полей выводит информативность геофизического комплекса на совершенно новый уровень. В силу того, что МТЗ более простой и дешевый для выполнения метод, чем МОГТ, профили МТЗ, ориентированные поперек структур, рекомендуется располагать в два раза чаще, чем сейсморазведочные. По тем же причинам имеет смысл проводить МТЗ в качестве опережающих работ, для оптимизации сети профилей МОГТ и экономии средств. Главным препятствием для оценки объективности получаемой информации является отсутствие скважин. Наметившись в последнее время положительные сдвиги в этом направлении внушают оптимизм в отношении перспектив нефтегазодобычи в палеозойских отложениях Таймыра.

Авторы выражают благодарность А.Г. Яковлеву, В.И. Казаису, Д.Г. Кушнiru, К.О. Соборнову, О.А. Ваясиной, Е.П. Широковой и К.Р. Овчинникову за помощь в работе над статьей.

**ЛИТЕРАТУРА**

**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, 2016а, № 6, с. 40—51.

**Афанасенков А.П., Никишин А.М., Унгер А.В., Бордунов С.И., Луговая О.В., Чикишев А.А., Яковишина Е.В.** Тектоника и этапы геологической истории Енисей-Хатангского бассейна и сопряженного Таймырского орогена // Геотектоника, 2016б, № 2, с. 1—20.

**Афанасенков А.П., Лыгин И.В., Обухов А.Н., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М.** Объемная реконструкция тектонических элементов Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации // Геофизика, 2017а, № 2, с. 60—70.

**Афанасенков А.П., Обухов А.Н., Каламкаров С.А., Чикишев А.А., Любаев Р.Р.** Новая тектоническая модель Енисей-Хатангского регионального прогиба // Материалы совещания «Тектоника современных и древних океанов и их окраин», Т. I, М., 2017б, с. 33—38.

**Дахнов В.Н.** Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. М., Л., Гостоптехиздат, 1951, 428 с.

**Девятов В.П., Савченко В.И.** Новые данные к переоценке ресурсов углеводородов Анабаро-Хатангской нефтегазоносной области // Геология нефти и газа, 2012, № 1, с. 55—61.

**Кушнir Д.Г.** Глубинное геологическое строение и перспективы нефтегазоносности приенисейской полосы Таймыра и Гыдана // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2016, т. 11, № 1, [http://www.ngtp.ru/rub/4/6\\_2016.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/4/6_2016.pdf).

**Макогон Ю.Ф.** Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2010, № 2, с. 5—21.

**Пронкин А.П., Савченко В.И., Ступакова А.В., Филипцов Ю.А., Шумский Б.В., Юбко В.М., Перетолчин К.А., Прокопцева С.В.** Новые данные о геологическом строении и нефтегазоносности Хатангской мезовпадины и сопредельной акватории моря Лаптевых // Природные ресурсы Красноярского края, 2014, № 23, с. 57—62.

**Рыжов А.А., Судоплатов А.Д.** Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. М., 1990, с. 27—41.

**Салов В.М., Уклеин В.Н., Канунников В.А.** Магнитотеллурические зондирования в Енисей-Хатангском и Норильско-Хараерлахском прогибах // «Геохимические и геофизические методы прямых поисков залежей углеводородов в Енисей-Хатангском прогибе. Л., ПГО «Севморгеология», 1984, с. 18—28.

**Сивцев А.И., Рожин И.И.** Нетрадиционный флюидоупор мерзлотно-гидратного генезиса // Материалы Международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению. Тюмень, 2011, с. 138—142.

**Соборнов К.О.** Перспективные направления поисков нефти и газа в России в контексте мировых трендов в геологоразведке // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2016, т. 11, № 1. [http://www.ngpr.ru/rub/6/4\\_2016.pdf](http://www.ngpr.ru/rub/6/4_2016.pdf).

**Якушев В.С.** Формирование скоплений природного газа и газовых гидратов в криолитозоне: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. М., ОАО ПНИИИС, 2009, 62 с.

**Archie G.E.** The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // Petroleum Transactions of AIME, 1942, v. 146, p. 54—62.

**Berdichevsky M.N., Bubnov V., Aleksanova E., Alekseev D., Yakovlev A. and Yakovlev D.** Magnetotelluric studies in Russia: Regional-scale surveys and hydrocarbon exploration // Methods in geochemistry and geophysics, electromagnetic sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice / Ed. V.V. Spichak, 2015, Elsevier, p. 379—401.

**Bedrosian P.A.** MT+, integrating magnetotellurics to determine Earth structure, physical state, and processes // Surv. Geophys., 2007, v. 28, p. 121—16.

**Hudec M., Jackson M.** Terra infirma: understanding salt tectonics // Earth Sci. Rev., 2007, v. 82, p. 1—28.

**Keller G.** Electrical prospecting for oil // Quarterly Journal of the Colorado School of Mines, 1968, v. 63, № 2, p. 1—268.

**Patro P.B.K., Brasse H., Sarma S.V.S. and Harinarayana T.** Electrical structure of the crust below the Deccan Flood Basalts (India), inferred from magnetotelluric soundings // Geophys. J. Int., 2005, v. 163(3), p. 931—943.

**Vozoff K.** The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins // Geophysics, 1972, v. 37, p. 98—141.

*Рекомендована к печати 20 сентября 2017 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию  
25 августа 2017 г.*