

УДК 550.379+550.311

## ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ О СТРОЕНИИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАЙОНЕ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ЛЕНЫ

© 2024 г. А. А. Заплавнова<sup>1,2</sup>, Е. В. Деев<sup>1,2</sup>, В. В. Потапов<sup>1,2</sup>

Представлено академиком РАН В.А. Верниковским 18.10.2023 г.

Поступило 18.10.2023 г.

После доработки 20.10.2023 г.

Принято к публикации 24.10.23 г.

Впервые выполнен профиль магнитотеллурических зондирований (МТЗ) для южной части дельты р. Лены, в зоне перехода от континента к шельфу моря Лаптевых, в области сочленения Сибирского кратона и Верхоянского складчато-надвигового пояса. Эти данные позволили построить вертикальный разрез удельных электрических сопротивлений (УЭС) и охарактеризовать основные структурные элементы земной коры до глубины 8 км. Верхний высокоомный слой (320–1000 Ом·м) показывает глубину распространения толщи многолетнемерзлых пород. Его максимальная мощность достигает 1 км, уменьшаясь под руслами проток до 400 м. Ниже находятся деформированные мезопротерозойско-нижнетриасовые породы различного состава, которые слабо дифференцированы в значениях УЭС (110–240 Ом·м). На их фоне отчетливо проявляются насыщенные флюидами зоны динамического влияния активных разломов, выраженные аномалиями с низкими значениями УЭС (10–60 Ом·м). На северо-восточном краю разреза выделяется глубинная аномалия с высокими значениями УЭС (320–350 Ом·м), которая может соответствовать нижнепротерозойским или архейским метаморфическим породам.

*Ключевые слова:* магнитотеллурическое зондирование, многолетняя мерзлота, активный разлом, земная кора, дельта, р. Лена

DOI: 10.31857/S2686739724020043

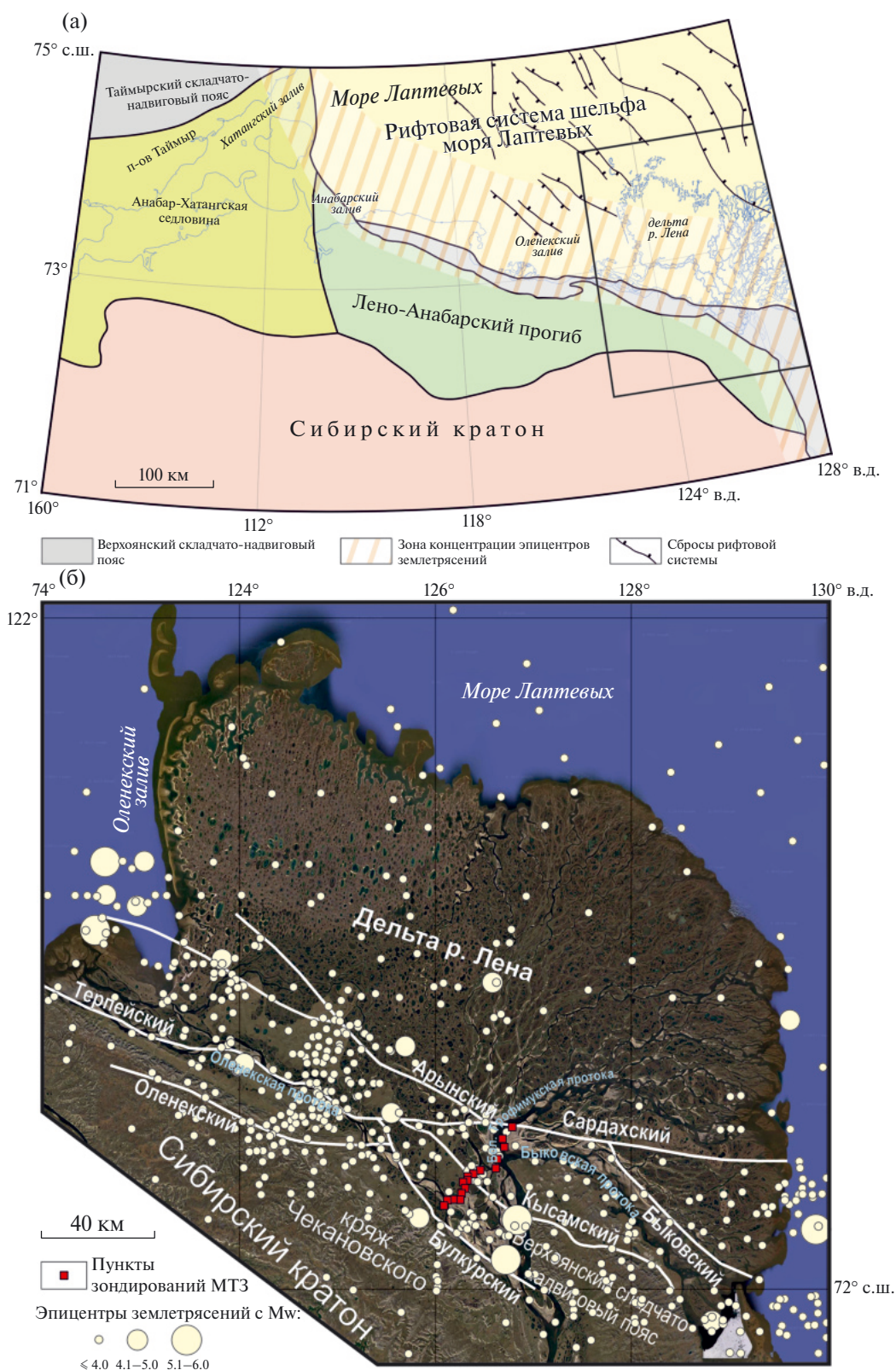
### ВВЕДЕНИЕ

В тектоническом аспекте крупнейшая в России арктическая дельта р. Лены площадью около 30 000 км<sup>2</sup> расположена в области сочленения Сибирского кратона и Верхоянского складчато-надвигового пояса (рис. 1 а), в зоне перехода от Евразийского континента к шельфу моря Лаптевых [1]. При этом прилегающий шельф моря Лаптевых осложнен ориентированными на северо-восток структурами позднемелкайнозойской Лаптевоморской рифтовой системы [2, 5, 6]. Одним из ключевых направлений изучения кайнозойской геодинамики этого стратегически важного для России региона является анализ структуры литосферы с выявлением зон активных межблоковых границ, их кинематики, связанной с ними сейсмичности.

Район моря Лаптевых является северной оконечностью зоны сейсмичности, которая начинается в Охотском море, протягивается вдоль хребта Черского и отмечает границу между Евразийской и Североамериканской литосферными плитами [7]. В районе дельты р. Лены пояс разветвляется на западную и восточную ветви. Западная ветвь концентрации эпицентров землетрясений прослеживается от залива Буор-Хая, через дельту р. Лены, Оленекский и Анабарский заливы моря Лаптевых к полуострову Таймыр (рис. 1 а). За последние 100 лет в ее пределах было зарегистрировано около 400 землетрясений с магнитудами до 5.5 и гипоцентрами на глубинах до 20 км [8]. Согласно данным геологического картирования и фокальным механизмам очагов землетрясений, отдельные сегменты этих разломов интерпретируются как сбросы или взбросы с присутствием левосдвиговой компоненты [3, 4, 8, 9]. В районе дельты р. Лены (рис. 1 б) землетрясения связаны с субпараллельными зонами Оленекского, Булкурского, Терпейского, Арынского, Сардахского

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия



**Рис. 1.** а – основные тектонические структуры зоны перехода от Евразийского континента к шельфу моря Лаптевых (сделан с использованием данных из [2]). б – активные разломы и сейсмичность района дельты р. Лены и прилегающих территорий. В качестве подложки использован космический снимок из программы Google Earth Pro. Белые линии – разломы в основании дельты р. Лены по [3]. Положение эпицентров землетрясений приведено по [4].

и Быковского разломов северо-западного простирания [3, 4].

Современные представления о глубинном строении земной коры в районе дельты р. Лены основываются в основном на информации, полученной в рамках экспедиций ПМГРЭ ПГО “Севморгеология” 1964–1988 гг. Они включают карты гравитационного и магнитного полей, ряд сейсмических профилей [6, 8–10]. Недавно были выполнены сейсмотомографические построения по данным локального сейсмологического мониторинга [12]. Основные сложности при проведении глубинных геофизических исследований обусловлены: 1) наличием чехла четвертичных отложений мощностью до 100 м [3]; 2) наличием толщи многолетнемерзлых пород мощностью более 500 м [13]. Изучение последней само по себе является важной задачей для анализа эволюции криолитозоны и связанных с ней явлений и процессов в условиях изменяющегося климата.

Ранее метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и его модификации не применялись для изучения дельты р. Лены и примыкающей к ней территории. Однако опыт других исследователей [14–18] показывает, что он может успешно применяться в высоких широтах для решения различных геологических задач. Цели представляемой работы – впервые с использованием метода магнитотеллурического зондирования получить новые данные о строении верхней части земной коры, активных разломах и мощности криолитозоны в районе дельты р. Лены.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в течение летних полевых сезонов 2019–2020 гг. Измерения выполнялись крестообразной установкой с длиной электрических линий 100 м, с использованием трех измерительных модулей MTU-5 (Phoenix Geophysics, Канада), позволяющих регистрировать четыре компонента ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ) магнитотеллурического поля (МТ-поля) в диапазоне периодов 0.003–10000 с. Всего выполнено 16 зондирований по профилю СВ-простирания (рис. 1). Шаг между пунктами зондирования составил от 2 до 3 км. Средняя длительность записи – 21 час.

Полевые данные обработаны с использованием программного пакета SSMT2000 (Phoenix Geophysics, Канада). Качественная и количественная интерпретация данных выполнена с применением программного комплекса “WinGLink” (“Schlumberger”, США).

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На протяжении всего профиля верхняя часть геоэлектрического разреза характеризуется высокими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) – 320–1000 Ом·м (рис. 2 а). Мощность слоя колеблется от 400 до 1000 м в юго-западной и центральной частях профиля. Понижение значений УЭС до 320 Ом·м и уменьшение мощности до 400 м верхнего слоя характерны для северо-восточной части профиля.

Глубже, в юго-западной части геоэлектрического разреза (пункт зондирования 4), присутствует субвертикальная зона пониженных значений УЭС – 20–40 Ом·м (рис. 2 а). Она сливается с зоной аналогичных сопротивлений, поднимающейся на юго-запад, от пункта зондирования 4 к пункту 1, с глубины от 8 до 2 км. Выше и ниже этой зоны находятся участки геоэлектрического разреза с УЭС 150–250 и 60–100 Ом·м соответственно. В последнем случае относительно невысокие значения сопротивлений частично связаны с влиянием соседней аномалии пониженных сопротивлений.

Еще одна субвертикальная крупная аномальная зона пониженных значений УЭС в диапазоне от 20 до 50 Ом·м на геоэлектрическом разрезе присутствует в районе 13 пункта зондирования (рис. 2 а). На юго-восток, к пункту зондирования 9, до глубины 2 км, от нее поднимается зона, в которой УЭС постепенно увеличиваются снизу вверх, от 70 до 100 Ом·м. Выше этой зоны измеренные значения УЭС на геоэлектрическом разрезе варьируют от 110 до 240 Ом·м. Значения УЭС от 120 до 150 Ом·м характерны для участков разреза, расположенных ниже наклонной зоны, а также к юго-западу от нее. Кроме этого, от вертикальной зоны с пониженными значениями УЭС в пункте зондирования 13 наклонная зона с УЭС 40 Ом·м поднимается и на северо-восток, к пункту зондирования 14, до глубины 6–4 км.

В северо-восточной части геоэлектрического разреза, восточнее пункта зондирования 13, в распределении значений УЭС отчетливо выделяется два различных интервала (рис. 2 а). Верхний из них характеризуется значениями УЭС от 120 до 240 Ом·м, нижний – значениями 320–350 Ом·м. Лишь в самом верхнем северо-восточном углу геоэлектрического разреза вновь появляется зона с явно пониженными значениями УЭС – от 10 до 60 Ом·м, прослеживающаяся до глубины 2 км.

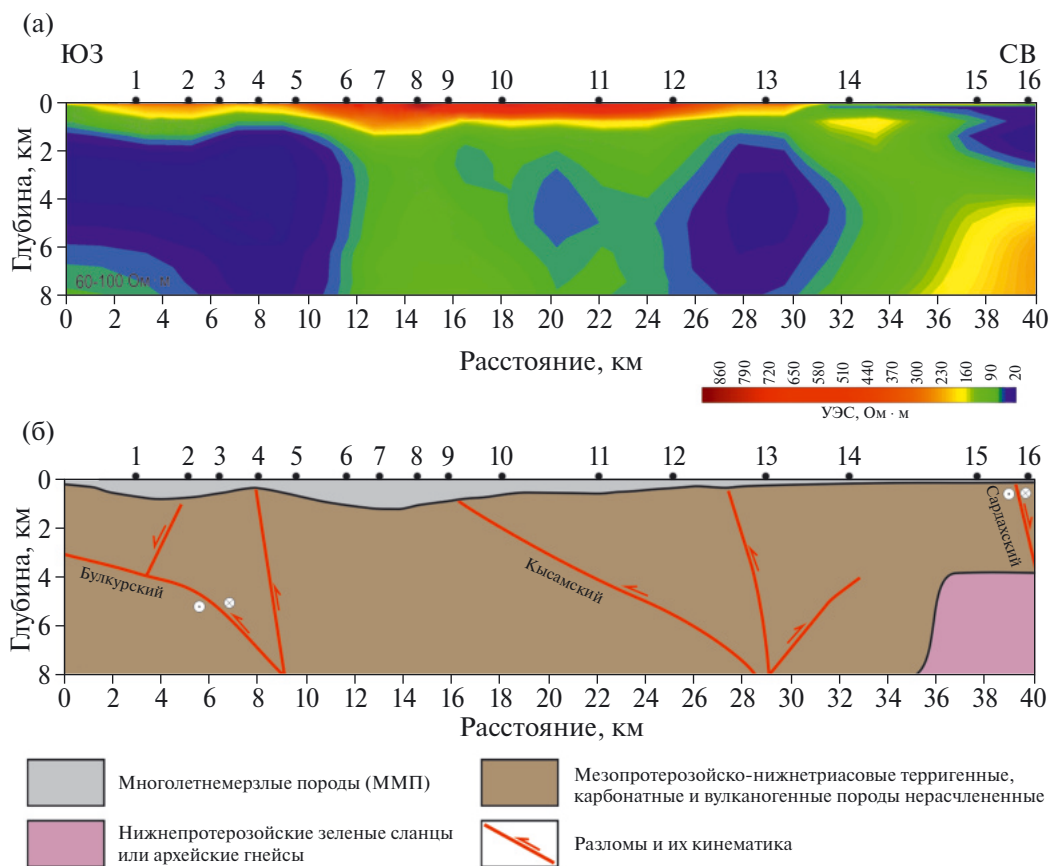


Рис. 2. Полученный геоэлектрический разрез (а) и его геологическая интерпретация (б).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

УЭС верхнего высокоомного слоя геоэлектрического разреза, резко контрастирующие с нижележащими частями разреза (рис. 2 а), и географическое расположение района работ позволяют с уверенностью соотнести этой слой с толщей многолетнемерзлых пород (рис. 2 б). Максимальная мощность толщи в 1000 м, определенная с использованием метода МТЗ, в два раза превосходит ранее установленные значения в 500 м [13]. Сокращение мощности многолетнемерзлых пород и значений УЭС в северо-восточной части профиля говорит о возможном присутствии зон частичного или сплошного протаивания (таликов) под основным руслом Лены и ее протоками.

Выполненный профиль МТЗ (рис. 1, 3) находится в пределах Бахстахско-Хараулахской зоны Верхоянского складчато-надвигового пояса, расположенной в районе дельты р. Лены, между ее Булкурской и Быковской протоками [3]. Разломные ограничения зоны на исследуемом участке представлены Булкурским надвигом

на юго-западе и Сардахским левым сдвигом на северо-востоке (рис. 3). В свою очередь, Бахстахско-Хараулахская зона разделена на два крупных блока Кысамским надвигом северо-западного простирания. Он выражен серией надвиговых пластин с амплитудой горизонтальных смещений от первых сотен метров до 1.5–2 км.

К юго-западу от Кысамского надвига расположена серия антиклиналей и синклиналей, сложенных преимущественно каменноугольно-нижнетриасовыми терригенными отложениями. Складчатые деформации осложнены надвигами. По Булкурскому разлому чешуи, сложенные каменноугольно-пермскими породами, надвинуты на терригенные меловые отложения (рис. 3), которые накапливались в позднеюрско-меловом Лено-Анабарском форландовом бассейне (прогибе, рис. 1 а) на краю Сибирского кратона [2]. В настоящее время мезозойские отложения обнажаются в пределах неотектонического поднятия кряжа Чекановского [3]. На неотектоническом этапе развития региона для зоны Булкурского разлома характерна также

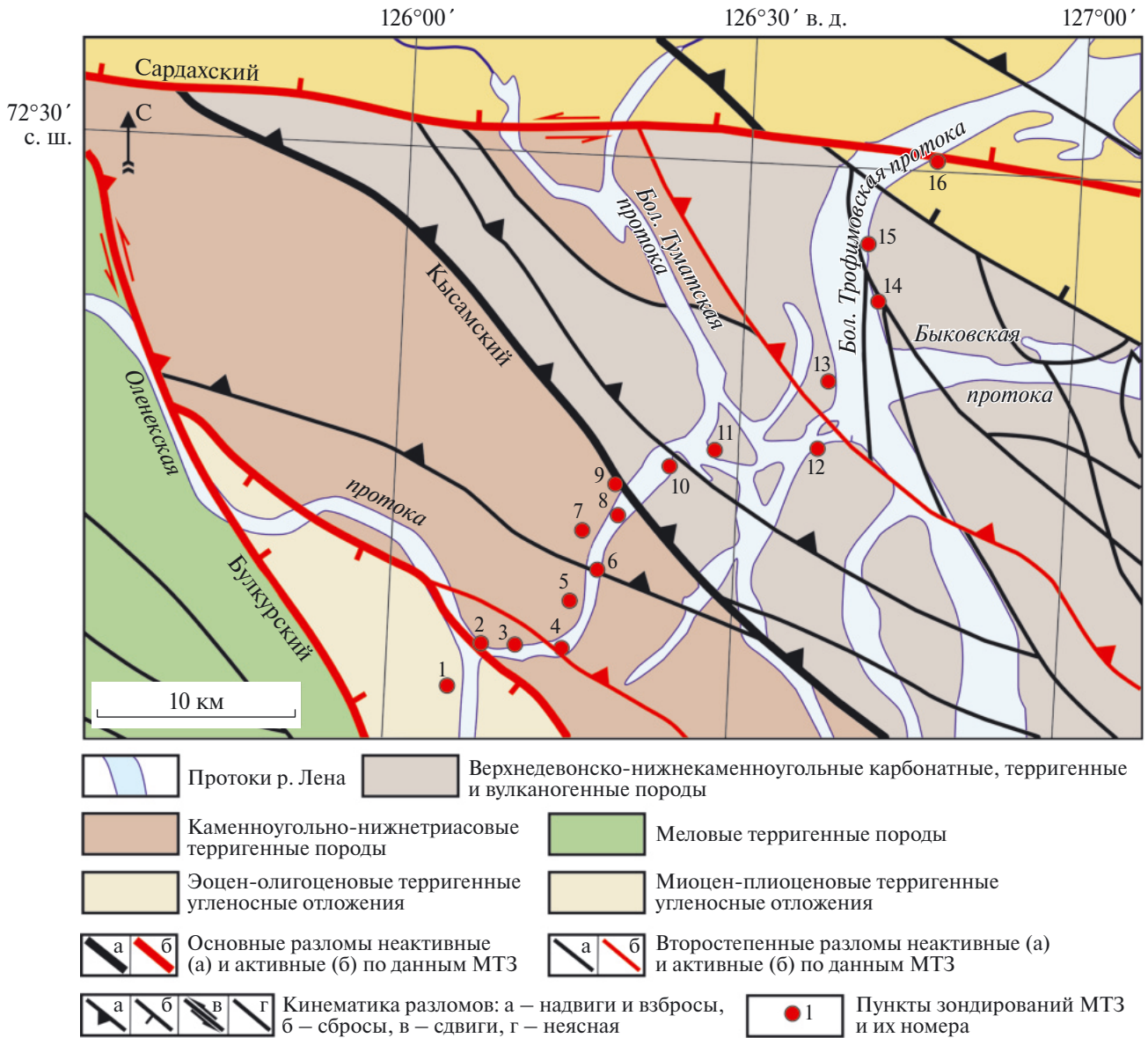


Рис. 3. Геологическое строение южной части дельты р. Лены (по [3, 9] с упрощениями и изменениями авторов).

левосдвиговая компонента смещения [19]. Возможно, в результате сдвиговых движений вдоль разлома сформировался грабен (пул-апарт бассейн), выполненный эоцен-олигоцеными терригенно-угленосными отложениями мощностью до 500 м [3]. К северо-востоку от Кысамского надвига расположена серия смещенных с амплитудами в 3–5 км на юго-запад надвиговых пластин, сложенных преимущественно девонско-нижнепермскими терригенными, терригенно-карбонатными, карбонатными и вулканогенными отложениями. Вместе с ними в складчато-надвиговые деформации в Бахстахско-Хараулахской зоне вовлечены

залегающие ниже карбонатно-терригенно-вулканогенные отложения мезопротерозоя-кембрия [3, 9].

На полученном геоэлектрическом разрезе отчетливо выделяются три зоны пониженных значений УЭС. Они пространственно совпадают с зонами выделенных при геологическом картировании разломов (рис. 2, 3). Глубинные флюидонасыщенные разломы образуют проводящие каналы, которые пересекают высокоомную литосферу и обеспечивают перераспределение избыточных токов. Поэтому такие разломы фиксируются в МТ-поле в виде проводящих геоэлектрических неоднородностей [20].

Наиболее крупная низкоомная аномалия сопротивлений расположена в юго-западной части геоэлектрического разреза (пункты зондирования 1–5 на рис. 2 а). Значительная площадь аномалии и сложная конфигурация определяются близким расположением нескольких субпараллельных разломов северо-западного простирания (рис. 2 б, рис. 3). Такая система разломов создает проводящие аномалии сложной формы и понижает измеренные значения сопротивлений на близко расположенных пунктах зондирования. Несмотря на это, помимо субвертикальной части аномалии, соответствующей зонам динамического влияния разломов между пунктами зондирования 2 и 5, отчетливо выделяется наклонная зона, которая может быть сопоставлена с Булкурским сдвиго-надвигом. Современная флюидная насыщенность зон динамического влияния разломов, создающих крупную низкоомную аномалию, а также их пространственное положение в зоне наибольшей концентрации очагов землетрясений на северо-восточной окраине Сибирского кратона [4, 8], свидетельствует в пользу отнесения этих разломов к категории активных.

Следующая крупная низкоомная аномалия расположена в районе 12 и 13 пунктов зондирования (рис. 2 а). Она пространственно совпадает со взбросом северо-западной ориентировки, выделенном при геологической съемке между пунктами наблюдений (рис. 2 б, 3). От нее на юго-запад, к пункту 9 зондирования, воздымается зона относительно пониженных значений УЭС – 110–70 Ом·м. Ее можно сопоставить с Кысамским надвигом. Относительно высокие значения УЭС в сравнении с основной частью аномалии могут свидетельствовать в пользу того, что зона динамического влияния Кысамского надвига в настоящее время значительно “залечена” и не содержит значительного количества флюида, а сам разлом относится к категории потенциально активных.

Наконец, еще одна низкоомная аномалия в верхней части геоэлектрического разреза выделена в районе пункта зондирования 16 (рис. 2 а). Сопоставление с материалами геологической съемки показывает, что она соответствует зоне динамического влияния Сардахского разлома (рис. 2 б, 3).

Здесь же, на глубине 4 км, выделяется кровля геоэлектрического слоя, обладающего повышенными значениями УЭС – 320–350 Ом·м. Такие значения УЭС и значительные глубины его залегания позволяют соотнести его с “кристаллическим” фундаментом, который может быть представлен нижнепротерозойскими зеленокаменно-измененными породами [3] либо архейскими

гнейсами [9]. Стоит отметить, что характерные значения УЭС для пород “кристаллического” фундамента обычно значительно превышают значения в 350 Ом·м. В нашем случае понижение значений УЭС может быть обусловлено повышенной трещиноватостью пород. На остальной части профиля МТЗ (0–30 км от начала) кровля “кристаллического” фундамента залегает на глубине более 8 км.

Деформированные мезопротерозойско-нижнетриасовые породы различного состава оказались слабо дифференцированными по значениям УЭС. Для них характерны значения УЭС от 110 до 240 Ом·м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполненные в южной части дельты р. Лены магнитотеллурические зондирования при сопоставлении с данными по региональной геологии и сейсмотектоники региона позволяют сделать следующие выводы.

1. Зондирования МТЗ позволили охарактеризовать структуру земной коры в области сочленения Сибирского кратона и Верхоянского складчато-надвигового пояса до глубины 8 км.

2. В пределах геоэлектрического разреза по пониженным значениям УЭС 10–60 Ом·м определяются зоны активных разломов с флюидонасыщенными зонами динамического влияния.

3. Для деформированных мезопротерозойско-нижнетриасовых пород различного состава характерен диапазон УЭС от 110 до 240 Ом·м. Участок геоэлектрического разреза со значениями УЭС 320–350 Ом·м, очевидно, соответствует “кристаллическому”, сложенному нижнепротерозойскими или архейскими метаморфическими породами. Пониженные значения УЭС объясняются трещиноватостью пород.

4. Максимальная мощность толщи многолетнемерзлых пород в 1000 м оказалась вдвое выше ранее полученных значений. Для нее характерен интервал УЭС от 320 до 1000 Ом·м. В районах крупных проток наблюдается уменьшение мощности высокоомного слоя, соответствующего многолетнемерзлым породам, до 400–500 м и определяются наиболее низкие значения УЭС. Это указывает на наличие подрусловых таликов под руслами проток р. Лены.

Важнейшим направлением последующих исследований является выявление структурной взаимосвязи установленных активных разломов с разломами, ограничивающими рифтовые структуры Лаптевоморской системы.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Полевые исследования выполнены в рамках государственного задания ИНГГ СО РАН (FWZZ-2022-0024), обработка и интерпретация результатов при финансовой поддержке проекта Российского Научного Фонда 23-17-00237.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В. и др.* Геодинамическая модель тектонического развития Арктики в мезозое и кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России // *Геотектоника*. 2013. № 1. С. 3–35. DOI:10.7868/S0016853X13010050
2. *Khudoley A.K., Frolov S.V., Akhmanov G.G., et al.* Anabar–Lena Composite Tectono-Sedimentary Element, northern East Siberia. In: Drachev S.S., Brekke H., Henriksen E., Moore T. (eds.) *Sedimentary Successions of the Arctic Region and their Hydrocarbon Prospectivity*. Geological Society, London, Memoirs. 2021. V. 57. DOI:10.1144/M57-2021-29
3. *Большиянов Д.Ю., Васильев Б.С., Виноградова Н.П. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S-51 – Оленекский зал., S-52 – дельта р. Лены. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 274 с.
4. *Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С.* Динамика рельефа и сеймотектоническая активизация новейших структур дельты р. Лена // *Геотектоника*. 2019. № 5. С. 62–77. DOI:10.31857/S0016-853X2019562-77
5. *Drachev S.S., Savostin L.A., Groshev V.G., Brunni I.E.* Structure and geology of the continental shelf of the Laptev Sea, Eastern Russian Arctic // *Tectonophysics*. 1998. V. 298(4). P. 357–393. DOI:10.1016/S0040-1951(98)00159-0
6. *Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В. и др.* Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54. № 8. С. 1083–1107.
7. *Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G., et al.* Seisnotectonics of the Chersky Seismic Belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan District, Russia // *Stephan Mueller Special Publication Series*. 2009. V. 4. P. 117–145. DOI:10.5194/smsps-4-117-2009
8. *Козьмин Б.М., Шибаев С.В., Петров А.Ф., Тимиршин К.В.* Лено-Таймырская аномалия сейсмоактивной среды на шельфе моря Лаптевых // *Наука и образование*. 2014. № 2. С. 105–110.
9. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1 000 000 (новая серия). Лист S-50–52 – Быковский. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2001. 189 с.
10. *Аветисов Г.П., Гусева Ю.В.* Глубинное строение района дельты Лены по сейсмологическим данным // *Отечественная геология*. 1991. № 4. С. 73–81.
11. *Аветисов Г.П., Ашихмина Е.А., Гусева Ю.Б.* Строение Усть-Ленского прогиба в южной части моря Лаптевых по данным КМПВ // *Отечественная геология*. 1994. № 1. С. 56–61.
12. *Дергач П.А., Епонешникова Л.Ю., Понасенко С.Н. и др.* Построение сейсмотомографической модели района научно-исследовательской станции «Остров Самойловский» по данным локального сейсмологического мониторинга за 2019–2021 гг. // *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13. № 2. DOI:10.5800/GT-2022-13-2s-0627
13. *Григорьев М.Н.* Криоморфогенез устьевой области р. Лены. Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 1993. 174 с.
14. *Niblett E.R., Kurtz R.D., Michaud C.* Magnetotelluric measurements over the Alpha Ridge // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1987. V. 45. Is. 2. P. 101–118. DOI: 10.1016/0031-9201(87)90045-8
15. *Borzotta E., Trombotto D.* Correlation between frozen ground thickness measured in Antarctica and permafrost thickness estimated on the basis of the heat flow obtained from magnetotelluric soundings // *Cold Regions Science and Technology*. 2004. V. 40. Is. 1–2. P. 81–96. DOI:10.1016/j.coldregions.2004.06.002
16. *Коротаев С.М., Жданов М.С., Орехова Д.А. и др.* Изучение возможности магнитотеллурического зондирования в Северном ледовитом океане с помощью численного моделирования // *Физика Земли*. 2010. № 9. С. 35–47.
17. *Beka T.I., Smirnov M., Bergh S.G., Birkelund Y.* The first magnetotelluric image of the lithospheric-scale geological architecture in central Svalbard, Arctic Norway // *Polar Research*. 2015. V. 34. DOI:10.3402/polar.v34.26766
18. *Яковлев Д.В., Яковлев А.Г., Валясина О.А.* Изучение криолитозоны северного обрамления Сибирской платформы по данным региональных электроразведочных работ // *Криосфера Земли*. 2018. Т. 22. № 5. С. 77–95.
19. *Гордеев Н.А.* Неотектоника и геодинамика северо-востока Сибирской платформы. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М.: ИФЗ РАН, 2021. 22 с.
20. *Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.

## THE STRUCTURE OF THE UPPER PART OF THE EARTH'S CRUST IN THE AREA OF THE LENA RIVER DELTA: THE FIRST MAGNETOTELLURIC DATA

A. A. Zaplavnova<sup>a, b</sup>, E. V. Deev<sup>a, b</sup>, V. V. Potapov<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>*A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

We present the first magnetotelluric sounding (MTS) data acquired in the southern part of the Lena River delta which is a junction zone of the Siberian Craton and the Verkhoyansk fold-and-thrust belt, in the transition zone from the Eurasian Continent to the shelf of the Laptev Sea. The MTS data were used to construct a vertical section of the bulk electrical resistivity (ER) structure of the Earth's crust down to a depth of 8 km. The upper high-resistivity layer (320–000 Ohm m) corresponds to the permafrost rocks ranging in thickness from 1 km to 400 m under the channels of the Lena River. The underlying deformed Mesoproterozoic– Lower Triassic rocks can vary in composition, but they are poorly differentiated in ER values (110–40 Ohm m). We detected three low-resistivity anomalies (10–0 Ohm m) related to the fluid-saturated core and damage zones of active faults. A deep-lying high-resistivity anomaly (320–50 Ohm m) identified at the northeastern part of the section can correspond to the Lower Proterozoic or Archean metamorphic rocks.

*Keywords:* magnetotelluric sounding, permafrost, active fault, Earth's crust, delta, Lena River