

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2021. № 4. (113). С. 74-86.

Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2021. № 4. (113). P. 74-86.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ: ГЕОФИЗИКА И КРИОСФЕРА

Научная статья

УДК 330.59 (470.345)

doi: 10.26110/ARCTIC.2021.113.4.005

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ МОРЕНЫ ЛЕДНИКА ИГАН В 2018-2021 ГГ.

*Александр Николаевич Шеин¹, Ярослав Константинович
Камнев²*

^{1,2}Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

¹A.N.Shein@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>

²KamnevYK@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2993-0979>

Аннотация. В статье представлены результаты измерений методом электротомографии на морены ледника ИГАН. В 2018-2021 гг. проводились мониторинговые измерения по сети профилей. Построены двумерные геоэлектрические разрезы. Сравнительный анализ разрезов позволил определить изменения в теле морены: происходит деградация мерзлого материала в краевых частях морены. Размер высокоомного материала (каменно-ледяного ядра) увеличивается к центру морены, что говорит о том, что в теле морены содержится достаточно цементирующего материала. Полученные данные можно использовать при оценке рисков природных катастроф в виде селей. Результаты исследования указывают на необходимость проведения дальнейшего мониторинга морены и подтверждают эффективность метода электротомографии для решения задач мониторинга приледниковых морен.

Ключевые слова: электротомография, морена, Полярный Урал, ледник.

Цитирование: А.Н. Шеин, Я.К. Камнев. Предварительные результаты исследований методом электротомографии морен-

ны ледника ИГАН в 2018-2021 гг. // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2021. (113). № 4. С. 74-86. doi: 10.26110/ARCTIC.2021.113.4.005

Original article

PRELIMINARY RESULTS OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY OF THE IGAN GLACIER MORaine IN 2018-2021

Alexandr N. Shein¹, Yaroslav K. Kamnev²

^{1,2}Arctic Research Center, Salekhard, Russia

¹A.N.Shein@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>

²KamnevYK@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2993-0979>

Abstract. The article presents the results of measurements of the IGAN glacier moraine by electrical resistivity tomography. In 2018-2021 monitoring measurements were carried out for a set of profiles. Two-dimensional geoelectric sections were obtained. A comparative analysis of the sections made it possible to determine changes in the moraine body: degradation of frozen material occurs in the marginal parts of the moraine. The size of the high-resistance material (rock-ice core) increases towards the center of the moraine, which indicates that the body of the moraine contains sufficient cementing material. The data obtained can be used to assess the risks of natural disasters in the form of mudflows. The results of the study indicate the need for further monitoring of the moraine and confirm the effectiveness of the electrical resistivity tomography for solving the problems of monitoring periglacial moraines.

Keywords: electrical resistivity tomography, moraine, Polar Urals, glacier.

Citation: A.N. Shein, Y.K. Kamnev. Preliminary results of electrical resistivity tomography of the IGAN glacier moraine in 2018-2021 // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2020. (113). № 4. P. 74-86. doi: 10.26110/ARCTIC.2021.113.4.005

Введение

В 1940-1970-х годах изучением ледников Полярного Урала, включая приледниковые морены, занимались исследователи из ВНИГИ [1], Института географии РАН [2, 3, 4]. До 1956 г. на Урале было выявлено более 50 ледников. Ввиду отсутствия стационарных наблюдений, процессы, формирующие уральские ледники и их режим, оставались не изучены [5]. Наиболее подробные исследования проводились в период Международного геофизического года (МГГ) и Гидрологического десятилетия (1965-1974). В 1959–1964 гг. выявлены и описаны новые ледники северных районов Урала. Эту работу при помощи материалов аэрофотосъемок и наземных обследований проводили Л.Д. Долгушин (1960), А.О. Кеммерих (1960) и Л.С. Троицкий (1963). К 1964 г. на Урале насчитывалось 143 ледника, а обобщенные сведения всех лет исследований об оледенении вошли в Каталог ледников СССР (1966) и монографию «Оледенение Урала» (1966). С 1981 г. систематические наблюдения за ледниками прекратились, краткие наблюдения проводились в экспедициях ИГ РАН и МГУ в 1999, 2008-2010, 2012, 2017 гг. С 2017 г. НЦИА и МГУ проводят новые исследования на ледниках в районе Хадатинских озёр, в том числе на леднике ИГАН [6].

Ледник ИГАН находится на Полярном Урале и расположен на восточном склоне горы Хар-Наурды-Кеу на высоте 1246 м, в районе озёра Большая Хадата-Юган-Лор на территории Государственного биологического (ботанического и зоологического) заказника регионального (окружного) значения «Горнохадатинский» Приуральского района Ямало-Ненецкого автономного округа. Он был открыт в 1953 г. Л.Д. Долгушиным. Изучением ледника ИГАН занимались в 1960 – 1970 гг. [3, 7]. По результатам проведённых исследований ледники ИГАН и Обручева на Полярном Урале являлись эталонами изученности в СССР и даже в мире. В 2007- 2012 гг. М.Н. Ивановым проведены полевые исследования на ледниках ИГАН и Обручева и получены новые сведения об их состоянии и эволюции [8]. Все эти исследования касались самого ледника ИГАН, но строение приледниковых территорий оставалось слабо изученным. Последние геофизические исследования на Полярном Урале проводились в 60-х годах прошлого века методами электро- и сейсморазведки по технологиям тех лет [9].

Интерес к ледникам связан с несколькими причинами. Прежде всего, мониторинг состояния ледников как индикаторов необходим для решения фундаментальных задач изучения климатических изменений. Помимо этого, таяние и сокращение ледников приводит к активизации ряда опасных процессов, таких как гляциальные паводки, селевые потоки, снежные лавины. Мониторинг приледниковых морен позволяет оценить гляциальную опасность и спрогнозировать возможные риски, что крайне важно в связи с проживанием на близлежащих территориях коренных ма-

лочисленных народов и рекреационной привлекательностью ледников и районов их распространения. Некоторые из этих задач можно решить, используя материалы дистанционного зондирования Земли. Однако результаты исследований малых ледников Урала в силу их малых размеров показали необходимость постоянного наземного мониторинга оледенения. Всё вышеперечисленное делает актуальной задачу мониторинга морены ледника ИГАН. В 2018-2021 гг. проводился мониторинг центральной части приледниковой морены методом электротомографии с целью построения геоэлектрической модели внутреннего строения морены, что в свою очередь необходимо для оценки рисков разрушения естественной дамбы.

Методика исследования

Электротомография (ЭТ) относится к группе методов сопротивления и сочетает в себе элементы вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и профилирования (ЭП).

Технология ЭТ основана на измерениях с помощью многоэлектродных установок и двумерной автоматической инверсии полученных данных [10]. При электротомографии в качестве питающих и измерительных электродов используются одни и те же расположенные на профиле заземления (рис. 1). Их количество может достигать нескольких десятков и даже сотен штук. Электроды заземляются с фиксированным шагом (в нашем случае 5 м) и подключаются к коммутационному кабелю (косе).

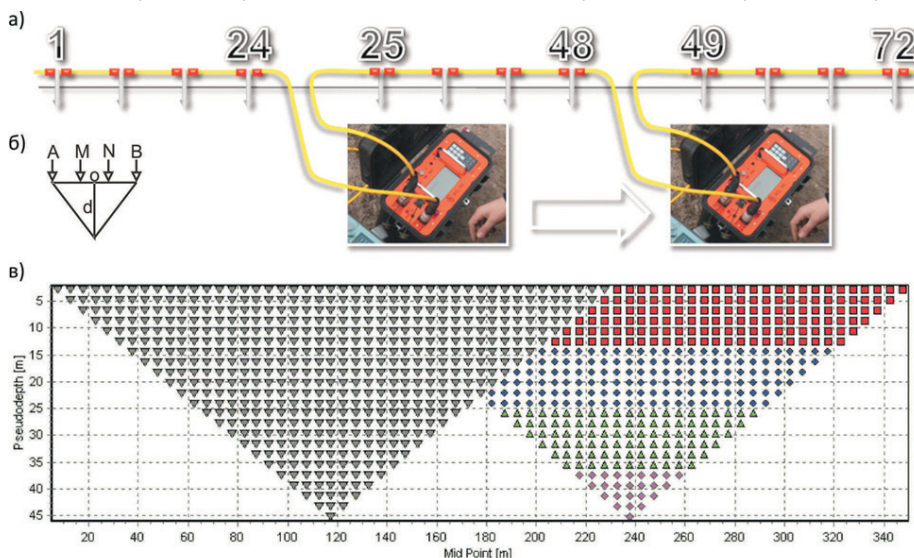


Рис. 1. Схема измерений при электротомографии: а – подключение электродов и кабелей к прибору; б – положение точки записи в симметричной установке; в – положение точки записи на псевдоразрезе

Такая схема измерений приводит к существенному увеличению плотности наблюдений по сравнению с традиционным методом вертикальных электрических зондирований. При этом плотность измерений соответствует детальности многоразностного электропрофилирования с шагом по профилю 5 м. Такой межэлектродный шаг позволяет достигать глубинности исследования от 25 до 40 м в зависимости от используемой установки (Шлюмберже и диполь-диполь).

Измерения выполнены многоэлектродной электроразведочной станцией «Скала-48» (совместная разработка ИНГГ СО РАН и ООО «КБ Электротри»), которая поочередно коммутирует и опрашивает различные комбинации электродов. Результатом измерений является информация о распределении кажущегося удельного электрического сопротивления по глубине вдоль профиля измерений (геоэлектрический разрез). Длина профилей (при межэлектродном расстоянии 5 м) составляла 235 м.

Качество измерений оценивалось аппаратными средствами прибора «Скала-48» по относительному стандартному отклонению измеренного сопротивления для каждого замера. Замеры, в которых погрешность определения сопротивления превышала 1%, выбраковывались при первичной обработке данных. Кроме того, оценивалась воспроизводимость данных при повторных зондированиях. При этом средняя относительная погрешность не превышала 5%, что удовлетворяет требованиям нормативных документов [11]. Измеренные профильные данные обрабатываются совместно. Такой подход позволяет построить двумерный геоэлектрический разрез. Решение обратной двумерной задачи (двумерная инверсия данных) выполняется с помощью специализированных программ.

На морене ледника ИГАН измерения методом ЭТ проводились Научным центром изучения Арктики совместно с МГУ в 2018 г., 2020 г. и во время летней экспедиции 2021 г. Повторные зондирования по одним и тем же профилям позволяют отследить динамику изменения удельного электрического сопротивления (УЭС) среды со временем.

В 2021 г. в южной части центральной морены ледника ИГАН проведены измерения методом электротомографии по трём профилям (рис. 2). Профиль 1 совпадал с измерениями, проведёнными в 2018 г. (рис. 2, серая кривая) и 2020 г. (рис. 2, синяя кривая). Профиль 2 (рис. 2, красная кривая) располагался параллельно первому в 30 м севернее (ближе к центру морены) и совпадал с измерениями, проведёнными в 2020 г. Профиль 3 (рис. 2, зелёная кривая) располагался параллельно первым двум в 30 м севернее профиля 2. В результате такого расположения профилей можно проследить изменения, произошедшие в теле морены за 2-3 года, построить геоэлектрическую модель и проследить внутреннее строение морены от края к центру, используя данные трёх профилей.

Результаты измерений методом электротомографии

Измерения проводились установкой диполь-диполь с межэлектродным расстоянием 5 м. Профили длиной 235 м ориентированы с запада на восток (рис. 2). Максимальная глубинность исследований достигала 30-35 м. При измерениях сила тока в питающей линии поддерживалась не ниже 20 мА, уровень напряжения на приёмных электродах составлял от 50 мВ. Стоит отметить сложности при заземлениях в крупнообломочный материал морены: электроды заземлялись с помощью влажного подсолёного грунта, который размещался между каменным материалом. Такие действия приводили к значительному увеличению трудозатрат при работах, тем не менее это позволяло снизить сопротивление заземлений до приемлемых ($\approx 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) значений. Общий объём работ ЭТ составил 705 п.м. Известно, что осевая дипольная установка (диполь-диполь) обладает хорошей чувствительностью к вертикальным границам, средней чувствительностью к горизонтальным границам. Установка Шлюмберже обладает одинаковой чувствительностью к горизонтальным и вертикальным границам. Наилучшие же результаты при инверсии данных ЭТ могут быть получены при комбинировании различных типов установок с последующей совместной инверсией [10, 12, 13]. Исходя из этого, кроме основных измерений установкой диполь-диполь, на каждом профиле проводились контрольные измерения установкой Шлюмберже.

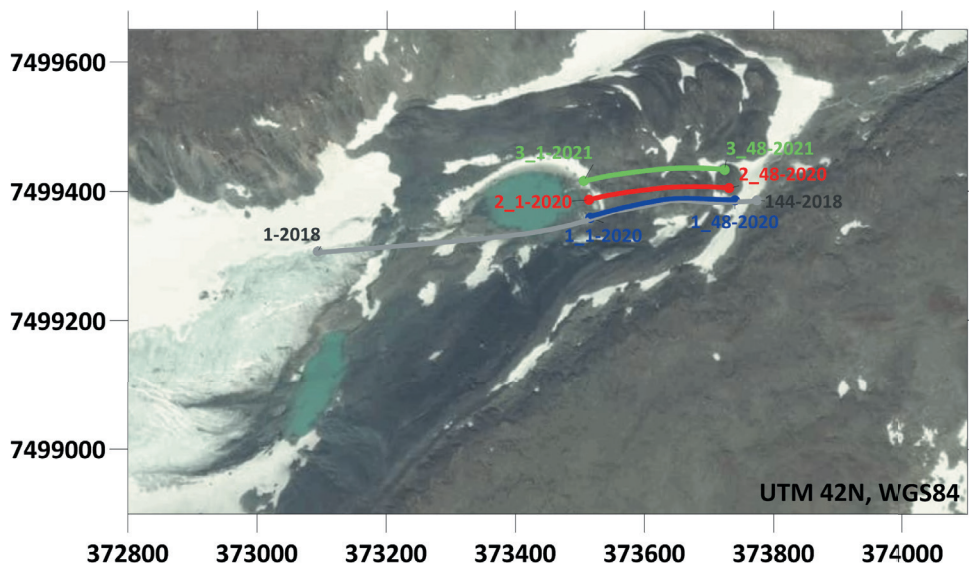


Рис. 2. Схема профилей ЭТ в южной части центральной морены ледника ИГАН. Серая кривая – профиль 2018 г., синяя кривая – профиль 1 2020/21 г., красная кривая – профиль 2 2020/21 г., зелёная кривая – профиль 3 2021 г.

Полученные разными установками разрезы подвергались сравнительному анализу, что служило инструментом контроля качества и корректности проводимых измерений. Один из примеров сравнения можно увидеть на рисунке 3. На качественном уровне результаты инверсии совпадают: изометричные аномалии высокого УЭС и проводящие зоны совпадают. Однако стоит сказать, что детальность геоэлектрического разреза, полученного при использовании установки диполь-диполь (рис. 3А) лучше, чем при использовании установки Шлюмберже (рис. 3Б). Центральная высокоомная часть разреза (90-150 м, рис. 3Б, сине-зелёные оттенки) и южная более проводящая часть морены (150-200 м, рис. 3Б, оттенки красного) выглядят наиболее консолидированно в отличие от результата, полученного при использовании установки диполь-диполь (рис. 3А). Такое строение ещё стоит подтвердить дополнительными исследованиями, но факт присутствия каменно-ледяных ядер подтверждается при каждом из проведённых измерений.

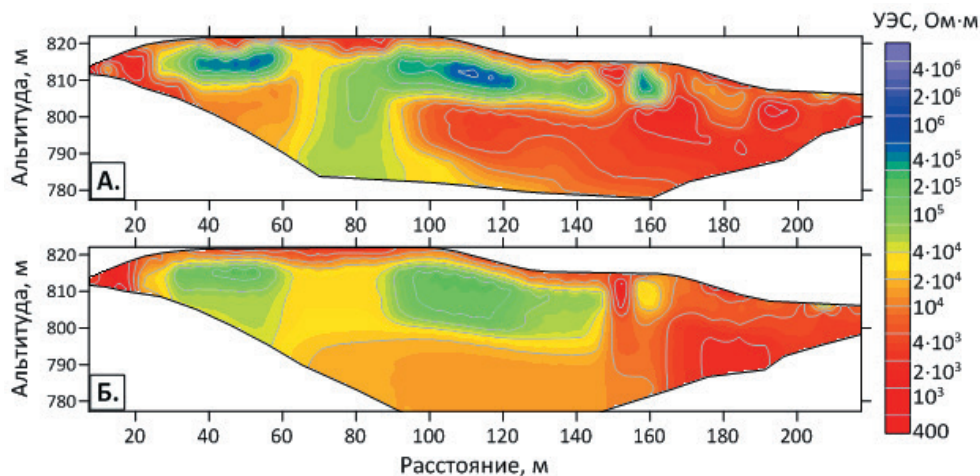


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы, построенные по данным электротомографии, полученным в 2021 г. на морене ледника ИГАН. А – профиль 1, установка диполь-диполь; Б – профиль 1, установка Шлюмберже

В результате проведённых измерений построено 3 геоэлектрических разреза по профилям 1-3. Они представлены на рисунке 4 в порядке, соответствующем схеме профилей (рис. 2): сверху (рис. 4А) самый северный профиль 3, снизу (рис. 4В) – южный профиль 1. На геоэлектрических разрезах можно проследить талые зоны с сопротивлением материала не больше 10 кОм·м (рис. 4, оттенки красного): в левой (до 20 м) части на профиле 1 (рис. 4В) проводящая зона связана с подозрительным таликом, а в правой на всех профилях (после 150 м) с маргинальным каналом, по которому происходит сток воды. Внутри морены выделяются аномалии высокого УЭС (больше 10 кОм·м, рис. 4, оттенки синего), предположительно,

связанные с каменно-ледяными ядрами. Эти отложения являются своего рода цементом естественной дамбы подпрудного озера. Стоит отметить, что при смещении к центру морены размер каменно-ледяных ядер возрастает.

Как уже говорилось, размер высокоомного материала (каменно-ледяных ядер) увеличивается к центру морены, что говорит о том, что в теле морены содержится достаточно цементирующего материала и риск возникновения катастрофического паводка из-за прорыва приледникового озера минимален. Однако существует вероятность разрушения (таяния) цементирующего материала. Чтобы проследить возможные изменения, происходящие в структуре ледяных ядер, были организованы периодические наблюдения по одним и тем же профилям. В 2020/21 гг. были проведены измерения по моренной части профиля, отснятого во время экспедиции 2018 г. (см. рис. 2, серая и синяя кривая). Измерения и обработка проводились идентичным образом, одним алгоритмом в одинаковых программах: установка диполь-диполь и робастная инверсия.

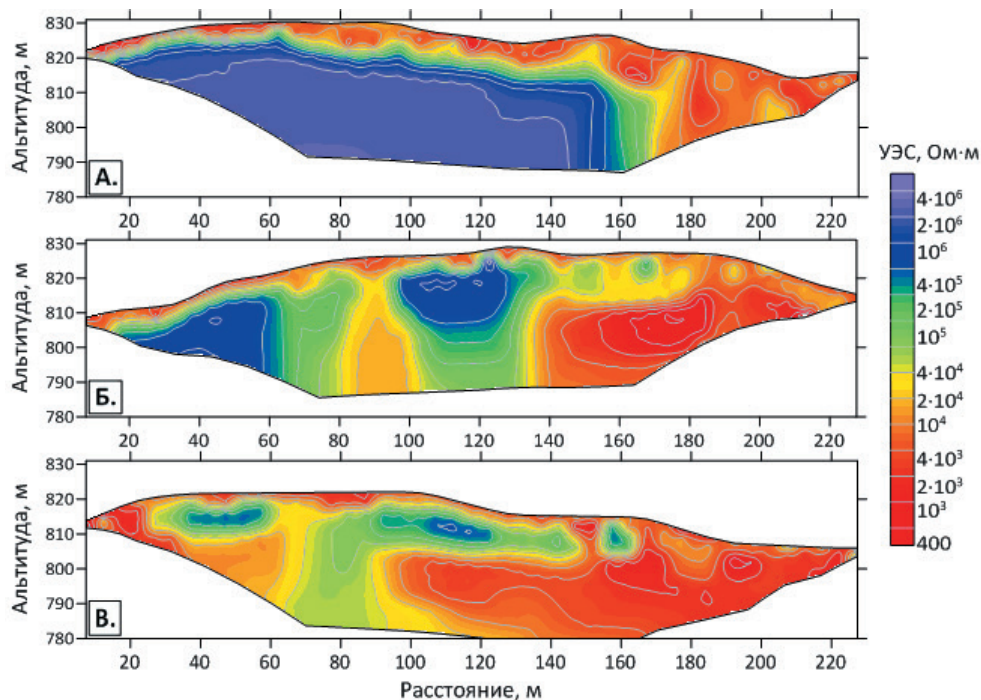


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы, построенные по данным электротомографии, полученным в 2021 г. на морене ледника ИГАН. А – профиль 3, Б – профиль 2, В – профиль 1

На рисунке 5А представлен участок геоэлектрического разреза, полученного в 2018 г. Ниже приводится результат инверсии данных электротомографии 2020 г. и 2021 г. по профилю 1 (рис. 5Б и 5В). Видно, что более выраженная талая (проводящая) зона появилась в приозёрной части профиля (40-60 м). Также происходит расширение талой (проводящей) зоны (оттенки красного на рис. 5, во второй половине профилей) с течением лет в восточной части морены: в 2018-2020 гг. — основная часть проводящей зоны распространялась от 140 до 230 м по профилю 1, а в 2021-м — от 100 до 230 м. Такие изменения внутреннего строения можно связать с таянием каменно-ледяного материала морены.

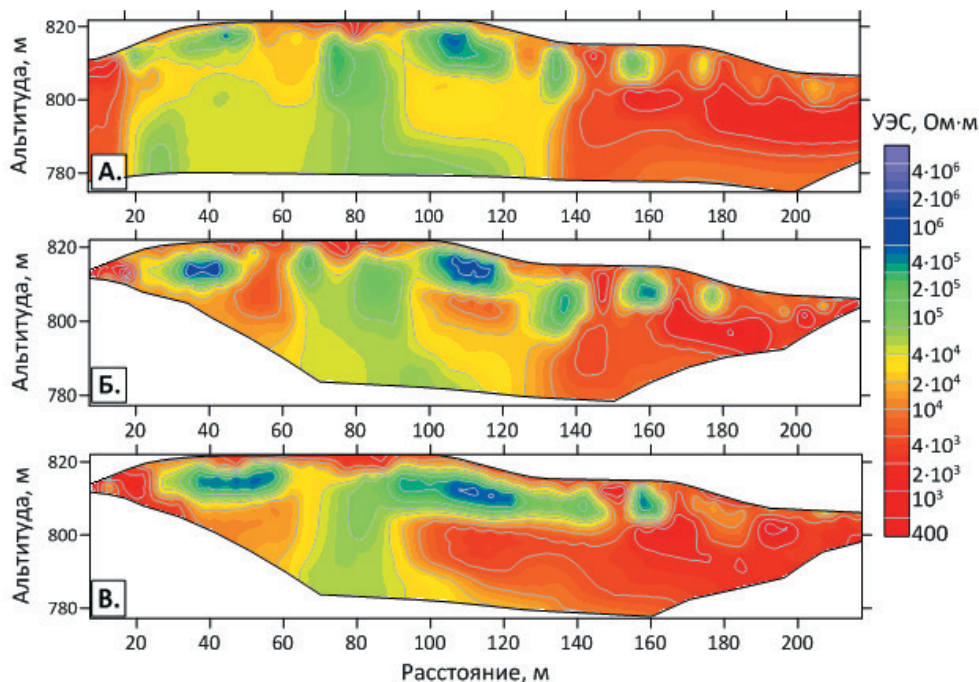


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы, построенные по данным электротомографии, полученным на морене ледника ИГАН в 2018 г. (А), 2020 г. (Б) и 2021 г. (В) по профилю 1 установкой диполь-диполь

Аналогичная, но менее динамичная картина наблюдается на профиле 2 (рис. 6). На рис. 6 представлены геоэлектрические разрезы, полученные методом электротомографии по профилю 2 в 2020 г. (рис. 6А) и в 2021 г. (рис. 6Б). Сопротивление пород морены в восточной части (130-230 м) уменьшилось, а сама талая зона (рис. 6, оттенки красного) увеличилась в 2021 г. по сравнению с 2020 г. Отметим, что изменения в строении морены ледника ИГАН происходят в краевой части. При движении к центру значительных изменений в каменно-ледяной части морены не наблюдается.

В дальнейшем представляется необходимым продолжить мониторинг центральной части морены методом электротомографии. Расширение сети наблюдения позволит более детально построить геоэлектрическую модель внутреннего строения морены, что в свою очередь необходимо для оценки рисков разрушения естественной дамбы.

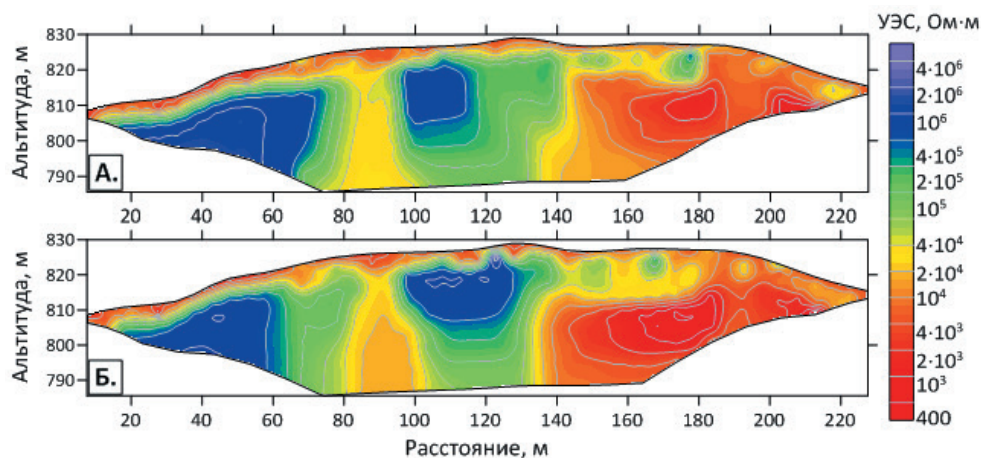


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы, построенные по данным электротомографии, полученным на морене ледника ИГАН в 2020 г. (А) и 2021 г. (Б) по профилю 2 установкой диполь-диполь

Заключение

В 2021 г. на морене ледника ИГАН Полярного Урала были продолжены мониторинговые измерения методом электротомографии. После предварительной обработки полученного материала можно сделать следующие выводы:

- сравнительный анализ разрезов позволил определить изменения в теле морены: происходит деградация мерзлого материала в краевых частях морены;
- размер высокоомного материала (каменно-ледяного ядра) увеличивается к центру морены, что говорит о том, что в теле морены содержится достаточно цементирующего материала. Полученные данные можно использовать при оценке рисков природных катастроф в виде селей;
- результаты исследования указывают на необходимость проведения дальнейшего мониторинга морены и подтверждают эффективность метода электротомографии для решения задач мониторинга приледниковых морен.

Список источников

1. Полярный Урал и его взаимоотношения с другими складчатыми областями / А.В. Хабаков. – Москва; Ленинград: Изд-во Главсевморпути, 1945. – 77 с., 2 л. карт.: ил.; 25 см. – (Труды Горно-геологического управления/ Глав. упр. Сев. мор. пути при СНК СССР; Вып. 15).
2. Долгушин Л.Д. Ледники Урала и некоторые особенности их эволюции. // Вопросы физической географии Урала. – М.: МОИП, 1960, с. 33-60.
3. Троицкий Л.С. О современной динамике ледников Полярного Урала. / Гляциологические исследования № 9. – М.: АН СССР, 1963, с. 94-102.
4. Троицкий Л.С., Ходаков В.Г., Михалев В.И., Гуськов А.С., Лебедева И.М., Адаменко В.Н., Живкович Л.А. Оледенение Урала – М.: Наука, 1966, 307 с.
5. Каталог ледников СССР. Том 03. Северный Край. Ч. 3. Урал. / Л.: Гидрометеоздат, 1966. – 52 с.
6. Камнев Я.К. Геоэлектрическое строение разреза у ледника Иган / Я.К. Камнев, Д.С. Панькова, В. В. Оленченко // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 124-128. – DOI 10.33764/2618-981X-2019-2-2-124-128.
7. Сурова Т.Г., Троицкий Л.С., Пуннинг Я.М. Палеогеография и абсолютная хронология голоцена Полярного Урала. // Известия АН ЭССР. Серия Химия, Геология. – 1975. – Т. 24. – № 2. – С. 152-159.
8. Иванов М.Н. Эволюция оледенения Полярного Урала в позднем голоцене. – М.: Географический факультет МГУ, 2013. – 200 с.
9. Боровинский Б.А. Электро- и сейсмические исследования многолетне-мерзлых горных пород и ледников. – М.: Наука, 1969. – 184 с.
10. Балков Е.В. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн, А.К. Манштейн, В.А. Белобородов // Геофизика. – 2012. – № 6. – С. 54–63.
11. Инструкция по электроразведке: Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка/М-во геологии СССР. – Л.: 1984. – 352 с.
12. Бобачев А.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации / А.А. Бобачев, А.А. Горбунов, И.Н. Модин, В.А. Шевнин // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 2. – С. 14–17.
13. Прямые и обратные задачи электротомографии для рудной геофизики: учеб.-метод. пособие / А.Н. Шеин, В.В. Оленченко; Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2021. – 130 с.

References

1. The Polar Urals and its relations with other folded areas / A.V. Khabakov. - Moscow; Leningrad: Publishing House of Glavsevmorput, 1945. - 77 p., Proceedings of Mining and Geological Administration / Chief Directorate of the Northern Sea Route under the Council of People's Commissars of the USSR; Issue 15.
2. Dolgushin L.D. Glaciers of the Urals and some features of their evolution. // Matters of the physical geography of the Urals. Moscow: MOIP, 1960, pp. 33-60.
3. Troitsky L.S. Modern dynamics of glaciers of the Polar Urals. / Glaciological Studies

- No. 9. - Moscow: USSR Academy of Sciences, 1963, pp. 94-102.
4. Troitsky L.S., Khodakov V.G., Mikhalev V.I., Guskov A.S., Lebedeva I.M., Adamenko V.N., Zhivkovich L.A. Glaciation of the Urals - Moscow: Nauka, 1966, 307 p.
 5. Catalogue of glaciers of USSR. Vol. 03. Northern Krai. Part 3 - Ural. / Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966. - 52 p.
 6. Kamnev Y.K. Geoelectric structure of the section near Egan glacier / Y.K. Kamnev, D.S. Pankova, V.V. Olenchenko // Interexpo Geo-Siberia. - 2019. - Vol. 2. - № 2. - pp. 124-128. - DOI 10.33764/2618-981X-2019-2-2-124-128.
 7. Ivanov M.N. Evolution of glaciation in the Polar Urals in the Late Holocene. - Moscow: Faculty of Geography, Moscow State University, 2013. - 200 c
 8. Surova T.G., Troitsky L.S. Punning Y.M. Paleogeography and absolute Holocene chronology of the Polar Urals. // Izvestiya AS ESSR. Chemistry, Geology Series. - 1975. - Vol.24. - №2. - pp. 152-159.
 9. Borovinsky B.A. Electro- and seismic studies of permafrost rocks and glaciers. - Moscow: Nauka, 1969. - 184 p.
 10. Balkov E.V. Electrical resistivity tomography: apparatus, methods and application experience / E.V. Balkov, G.L. Panin, Y.A. Manstein, A.K. Manstein, V.A. Beloborodov // Geophysics. - 2012. - № 6. - pp. 54-63.
 11. Instructions for electric prospecting: Ground electric prospecting, borehole electric prospecting, mine electric prospecting, air electric prospecting, marine electric prospecting. - Leningrad: 1984. - 352 p.
 12. Bobachev A.A. Electro-tomography by resistivity and induced polarization / A.A. Bobachev, A.A. Gorbunov, I.N. Modin, V.A. Shevnin // Devices and systems of exploration geophysics. - 2006. - № 2. - pp. 14-17.
 13. Direct and Inverse Tasks of ElectroTomography for Ore Geophysics: Tutorial / A.N. Shein, V.V. Olenchenko; Novosibirsk State University. - Novosibirsk: IPC NSU, 2021. - 130 p.

Сведения об авторах

Шейн Александр Николаевич, 1981 г.р., окончил механико-математический факультет НГУ, в 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию. ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (Салехард, Россия), ведущий научный сотрудник сектора криосферы, к.ф.-м.н. Сфера научных интересов: численное моделирование электромагнитных и температурных полей, криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электроразведка, электротомография, георадиолокация, процессы вызванной поляризации.

Камнев Ярослав Константинович, 1987 г.р., окончил физический факультет НГУ, в 2016 г. защитил кандидатскую диссертацию. ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (Салехард, Россия), заведующий сектором криосферы, к.ф.-м.н. Сфера научных интересов: криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электроразведка, электротомография, георадиолокация.

Участие авторов

Шейн А.Н. – организация и проведение полевых работ, обработка и интерпретация данных, написание и редактирование текста;

Камнев Я.К. – концепция исследования, организация и проведение полевых работ, написание и редактирование текста;

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Information about the authors

Alexandr Nickolaevich Shein, born in 1981, graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics of the Novosibirsk State University, defended his PhD thesis in 2010. Leading researcher of the Cryosphere Sector of the Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District (Salekhard, Russia), Candidate of Physico-Mathematical Sciences. Research interests: numerical modeling of electromagnetic and temperature fields, cryolithozone, geotechnical monitoring, transient electromagnetics, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar, induced polarization.

Yaroslav Konstantinovich Kamnev, born in 1987, graduated from the Faculty of Physics of the Novosibirsk State University, defended his PhD thesis in 2016. Head of the Cryosphere Sector of the Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District (Salekhard, Russia), Candidate of Physico-Mathematical Sciences. Research interests: cryolithozone, geotechnical monitoring, transient electromagnetics, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar.

Authors Contribution

Shein A.N. – organization and conduct of fieldwork, data processing and interpretation, text writing and editing;

Kamnev Y.K. – research concept, organization and conduct of fieldwork, text writing and editing.

All co-authors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Статья поступила в редакцию 11.10.2021 г., принята к публикации 02.12.2021 г.

The article was submitted on October 11, 2021, accepted for publication on December 2, 2021.