

## Геофизические исследования на леднике ИГАН в 2021 г.

*А. Н. Шейн<sup>1,2\*</sup>, И. И. Лаврентьев<sup>3</sup>, Г. А. Носенко<sup>3</sup>, М. Н. Иванов<sup>4</sup>, Я. К. Камнев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», г. Салехард, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>3</sup> Институт географии Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Географический ф-т, г. Москва, Российская Федерация

\* e-mail: a.n.shein@yandex.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования ледника ИГАН в 2019-2021 гг. геофизическими методами. Измерения толщины снежного покрова и льда проводились с помощью георадаров ПИКОР-ЛЁД (1600 МГц), и ВИРЛ-7 (20 МГц), соответственно. Исследования выявили значительное снегонакопление на леднике в зимний период и его пространственное распределение, а также показали значительную толщину льда (до 106 м) и политермическую структуру ледника. Методом электротомографии проводился мониторинг центральной части приледниковой морены. Построены двумерные геоэлектрические разрезы и трёхмерная геоэлектрическая модель внутреннего строения морены. Размер каменно-ледяного ядра (высокоомные породы) увеличивается к центру морены, а в её краевых частях происходит активная деградация мерзлого материала.

**Ключевые слова:** радиолокационное зондирование, электротомография, ледник, Полярный Урал

## Geophysical research on the IGAN Glacier in 2021

*A. N. Shein<sup>1,2\*</sup>, I. I. Lavrentiev<sup>3</sup>, G. A. Nosenko<sup>3</sup>, M. N. Ivanov<sup>4</sup>, Ya. K. Kamnev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, Salekhard, Russian Federation

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS,  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Institute of Geography RAS, Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Geography dept., Moscow, Russian Federation

\* e-mail: a.n.shein@yandex.ru

**Abstract.** The results of radar studies of the IGAN glacier carried out in 2019 and 2021 are presented in the paper. Measurements of the thickness of the snow cover and ice were carried out using the PICOR-LED GPR (1600 MHz) and VIRL-7 (20 MHz), respectively. Studies have revealed significant winter snow accumulation on the glacier and its stable spatial distribution, and also showed a significant ice thickness (up to 106 m) and the polythermal structure of the glacier. Electrotomography was used to monitor the central part of the glacial moraine. Two-dimensional geoelectric sections and a three-dimensional geoelectric model of the internal structure of the moraine are constructed. The size of the rock-ice core (high-resistance rocks) increases towards the center of the moraine, nevertheless, there is an active degradation of frozen material in the marginal parts of the moraine.

**Keywords:** radio-echo sounding, electrical resistivity tomography, glacier, Polar Urals

### *Введение*

Мониторинг ледников во всём мире сосредоточен в основном на средних и крупных ледниках, а понимание процессов, происходящих с малыми ледниками, остаётся неполным. Исследования ледников Полярного Урала, начатые

в середине XX века, дополняют общую картину: они имеют самый длинный ряд наблюдений среди ледников горных районов материковой части России, расположенных в полярных широтах [1-3]. К Полярному Уралу относится самая северная часть Уральского хребта, современное оледенение которого представлено снежно-ледовыми образованиями площадью до 1 км<sup>2</sup>. Располагаясь ниже климатической снеговой границы, ледники существуют благодаря низким температурам воздуха и высокой концентрации снега в карах и на уступах подветренных склонов в результате метелевого и лавинного переноса снега. Они образуют отдельные очаги оледенения, приуроченные к наиболее возвышенным и расчленённым участкам хребта.

Ежегодные систематические наблюдения за ледниками продолжались с 1958 г. до 1981 г. Позже проводились краткие наблюдения [4-7]. Мониторинг состояния ледников, как индикаторов окружающей среды, 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.

Одним из ключевых объектов является ледник ИГАН, который расположен на восточном склоне горы Хар-Наурды-Кеу (высота 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 и назван в 1953 г. Л.Д. Долгушиным.

### *Методика георадарной съёмки*

В весенний период 2021 г. «Научным центром изучения Арктики» (г. Салехард) совместно с Институтом географии РАН и Географическим факультетом МГУ им. М.В. Ломоносова была проведена гляциологическая экспедиция на ледник ИГАН. Целью исследований было измерение аккумуляции снега и толщины ледника с использованием георадарной съёмки. Полученные данные при сравнении с прошлыми измерениями позволят оценить баланс массы ледника (изучить пространственно-временную изменчивость ледника). Для измерений толщины снежного покрова использовался высокочастотный (1600 МГц) радиолокатор «Пикор-Лёд», совмещённый антенный блок которого, закреплённый на пластиковых санях-волокушах, перемещался по поверхности ледника оператором на лыжах. Было получено около 5,6 километров снегомерных профилей (в 2019 г. – около 4 км) (рис.2). Для измерений толщины льда применялся радиолокатор ВИРЛ-7 (20 МГц), компоненты которого (приёмник, передатчик, блок управления, GPS и источники питания) были зафиксированы на 2-х санях-волокушах. Вся конструкция перемещалась по доступной площади ледника оператором на лыжах по сети продольных и поперечных профилей. Визуализация и обработка радарных данных производилась в программе RadexPro Plus 2011.1. Граф обработки состоял из стандартных процедур: удаление задержки, удаление звона антенны (вычитание среднего), полосовая фильтрация и амплитудная коррекция за сферическое расхождение, а также Stolt-ФК миграция для коррекции радарных записей с применением Фурье-анализа, поз-

воляющего уточнить толщину льда и геометрию ложа за счёт коррекции глубины и положения боковых отражений. Примеры радарограмм, полученных на леднике обоими локаторами, приведены на рис.1.

### *Методика электротомографии*

В летний период 2021 гг. в южной части конечной морены ледника ИГАН проведены измерения методом электротомографии по трём параллельным профилям длиной 235 м. Исследования проводились с целью изучения внутреннего строения морены и для продолжения мониторинга её состояния. Измерения выполнены многоэлектродной электроразведочной станцией «Скала-48» (совместная разработка ИНГГ СО РАН и ООО «КБ Электротометрии»), которая поочередно коммутирует и опрашивает различные комбинации электродов. Измерения проводились по стандартной методике [8-10] установкой диполь-диполь с межэлектродным расстоянием 5 м, что обеспечивало глубинность 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 ( $\approx 10$  кОм·м) значений. Во время работы наблюдались малые величины электрических помех.

В результате получена информация о распределении кажущегося удельного электрического сопротивления внутреннего строения морены (рис. 3).

### *Результаты георадарной съёмки*

Результаты обработки данных радарной снегомерной съёмки показали постепенное увеличение толщины снега от языка ледника к тыловой стенке кара, где её величина достигала 7 м и более. Такое распределение снега соответствует условиям лавинного питания данного ледника и преобладающего северо-западного метелевого переноса (рис. 2). Измерения в контрольных шурфах на пересечении продольного и поперечного профилей подтвердили результаты радиолокации с точностью 0,1 м.

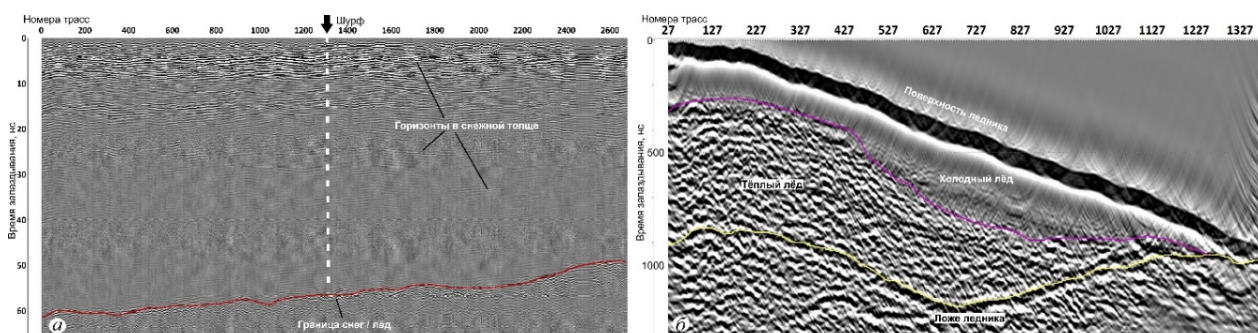


Рис. 1. Радарограммы, полученные на частоте 1600 МГц (а) и 20 МГц (б) на профиле вдоль центральной оси ледника.

Измерения толщины льда низкочастотным локатором показали, что она достигает 106 м, а в среднем составляет 47 м. Анализ полученных радарограмм показал, что ледник ИГАН имеет политермическую структуру скандинавского типа. Верхний холодный слой льда имеет среднюю толщину 12 м (максимальные значения достигают 44 м), а толщина тёплого нижнего слоя льда достигает 106 м (средняя величина 36 м).

Оценка снегонакопления в зимние сезоны 2018-2019 и 2020-2021 показывает, что аккумуляция на леднике ИГАН находится на среднем многолетнем уровне значений, что позволяет леднику существовать в условиях современных климатических изменений (увеличение температуры и сокращение осадков).

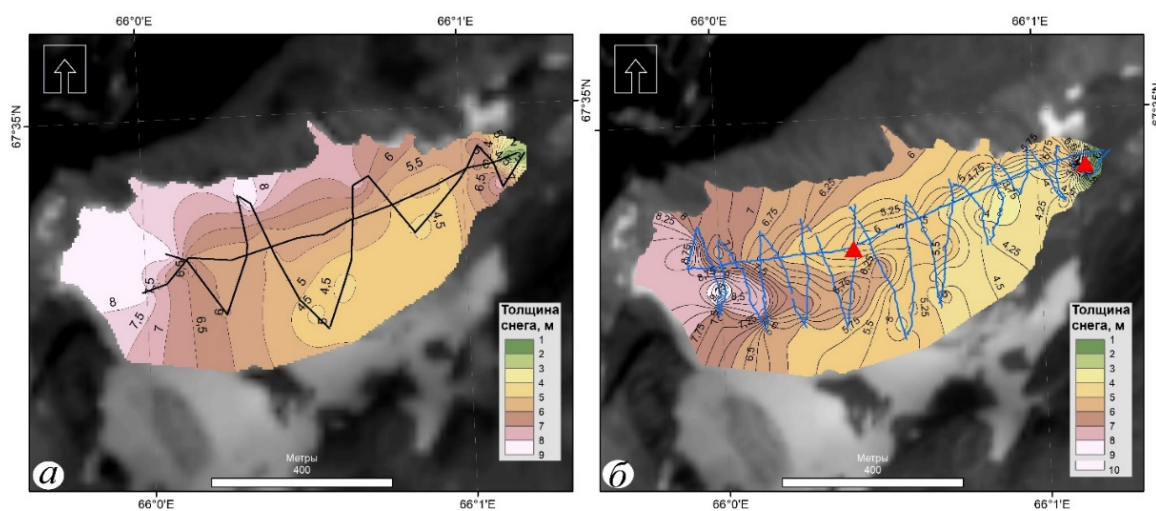


Рис. 2. Профили радиозондирования и карты толщины снежного покрова (аккумуляции) и на леднике ИГАН в 2019 г. (а) и 2021 г. (б)

### *Результаты измерений методом электротомографии*

В результате проведённых измерений методом электротомографии построено 3 геоэлектрических разреза по профилям 1-3: сверху (рис. 3А) самый северный профиль 3, расположенный ближе к центру морены, снизу (рис. 3В) – южный профиль 1, расположенный в краевой части морены. На геоэлектрических разрезах можно проследить талые зоны с сопротивлением материала не больше 10 кОм·м (рис. 3, оттенки красного): в левой (до 20 м) части на профиле 1 (рис. 3В) проводящая зона связана с подозёрным 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. 3, 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.

Стоит отметить, что сравнение с исследованиями, проведёнными в прошлые годы [11], позволяют утверждать, что в краевых частях морены происходит деградация мерзлого материала.

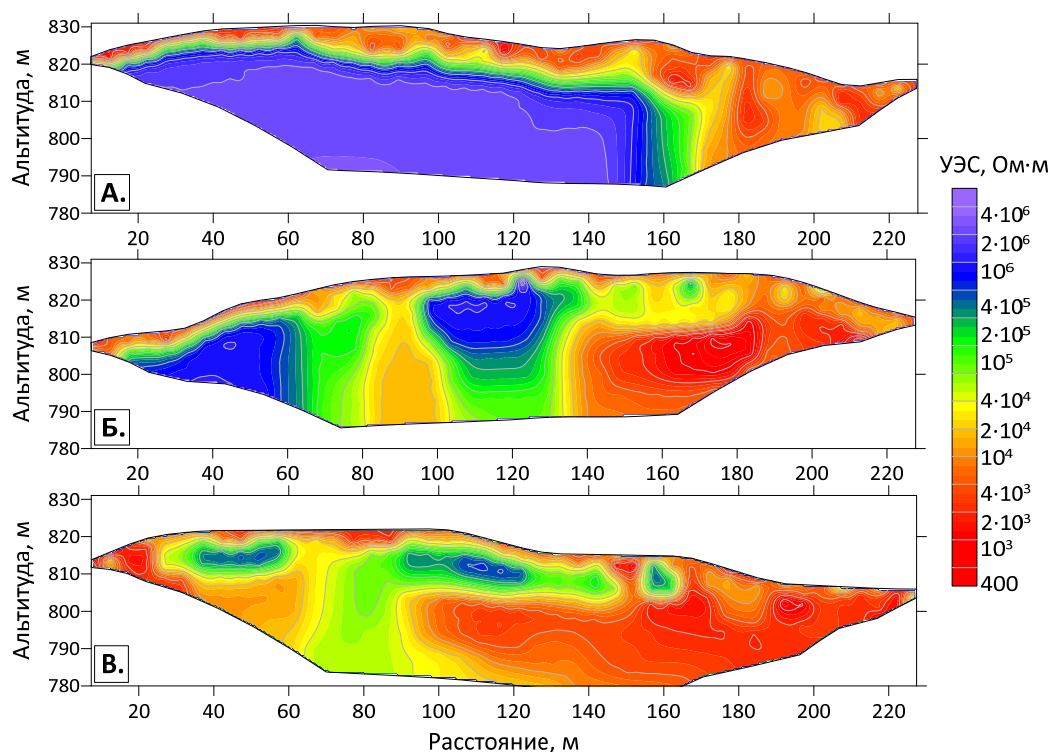


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы, построенные по данным электротомографии, полученным в 2021 г. на морене ледника ИГАН. А – профиль 3, Б – профиль 2, В – профиль 1

### Заключение

В результате георадарной съёмки установлено постепенное увеличение толщины снега от языка ледника к тыловой стенке кара, где её величина достигала 7 м и более. Толщины льда достигают 106 м, а в среднем составляет 47 м.

Применение метода электротомографии позволило определить геоэлектрическую модель внутреннего строения центральной морены: размер высокоомного материала (каменно-ледяного ядра) увеличивается к центру морены. Сам метод подтвердил свою эффективность при исследовании и мониторинге моренных отложений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. 355 с.
2. Цветков Д.Г. 10 лет фотогеодезических работ на ледниках Полярного Урала (Опыт наземной съёмки и составления планов малых ледников с приложением топокарт ледников ИГАН и Обручева в масштабе 1:5000) // МГИ, Вып. 16, 1970 – С. 245–257.
3. Волошина А.П. Некоторые итоги исследований баланса массы ледников Полярного Урала // МГИ, Вып. 61, 1988 – С. 44–51.
4. Иванов М. Н. Эволюция оледенения Полярного Урала в позднем голоцене. – М.: Географический факультет МГУ, 2013. – 200 с.
5. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников – М.: Научный Мир, 2006. 389 с.

6. Shahgedanova M., Nosenko G., Bushueva I., Ivanov M. Changes in area and geodetic mass balance of small glaciers, Polar Urals, Russia 1950–2008 // Journ. Of Glaciology, Vol. 58, № 211, 2017 – pp. 953–964. doi: 10.3189/2012JoG11J233.
7. Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Иванов М.Н., Сеницкий А.И., Кобелев В.О., Никитин С.А. Реакция ледников Полярного Урала на современные изменения климата // Лёд и Снег. – 2020– № 60 (1). – С. 42-57. <https://doi.org/10.31857/S2076673420010022>
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.

© А. Н. Шеин, И. И. Лаврентьев, Г. А. Носенко, М. Н. Иванов, Я. К. Камнев, 2022