

*М. В. Медведева<sup>1\*</sup>, В. В. Оленченко<sup>1,2</sup>, А. А. Заплавнова<sup>1,2</sup>*

## **Трёхмерная геоэлектрическая модель участка разгрузки наледных вод по данным электротомографии**

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

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

\* e-mail: m.medvedeva2@g.nsu.ru

**Аннотация.** Наледные поля широко распространены по всему миру, в том числе и в России, в ее северных и горных областях. Появление наледей негативно сказывается на инфраструктуре жилых районов, при этом существующие методы борьбы с ними не всегда оказываются эффективны. Изучение источников питания наледей позволит разработать действенные способы по пространственному ограничению наледных полей. На примере наледного бугра в Чуйской впадине Горного Алтая была показана эффективность метода электротомографии (ЭТ) для обнаружения обводнённых разломных зон, питающих наледь. По данным метода ЭТ питание наледи осуществляется по трем разломам, уходящим в глубину более чем на 100 м, что доказывает глубинное происхождение минерализованных вод. На глубине порядка 10 метров располагаются высокоомные породы, которые являются многолетнемерзлыми и в зимний период выступают в роли водоупора, способствуя образованию наледных полей и бугров.

**Ключевые слова:** наледь, наледный бугор, электротомография, разлом

*M. V. Medvedeva<sup>1\*</sup>, V. V. Olenchenko<sup>1,2</sup>, A. A. Zaplavnova<sup>1,2</sup>*

## **Three-dimensional geoelectric model of the ice water discharge area based on electrical resistivity tomography method**

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

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

\* e-mail: m.medvedeva2@g.nsu.ru

**Abstract.** Ice fields are widespread all over the world, including Russia, in its northern and mountainous regions. The appearance of ice fields negatively affects the infrastructure of residential areas, and the existing methods of their control are not always effective. Studying the sources of ice supply will allow us to develop effective ways to limit them. On the example of the ice hillock in the Chuysk depression of the Altai Mountains, the effectiveness of the electrical resistivity tomography (ERT) method was shown. According to the data of ERT methods, the glacier is fed by three faults, going to the depth of more than 100 m, which proves the deep origin of mineralized water. At a depth of about 10 meters there are low resistive rocks, which are perennially frozen and in winter act as a water-support, contributing to the formation of ice fields and icing blister.

**Keywords:** aufeis, icing blister, electrical resistivity tomography, fault

## ***Введение***

Наледообразование является опасным инженерно-геологическим процессом, который может иметь негативные и даже катастрофические последствия для инфраструктуры района их формирования. Чаще всего, инженерная защита необходима автомобильным и железным дорогам, линиям электропередач, а также жилым и промышленным сооружениям [1]. Но, стандартные методы борьбы с наледными явлениями, такие как противоналедные валы, экраны или щиты и т.п. далеко не всегда оказываются эффективны. Для снижения или полного исключения негативного воздействия наледей, при разработке инженерной защиты следует учитывать результаты инженерно-геологических изысканий, в том числе геофизических исследований.

В мировой практике для исследования строения районов образования наледей активно используют методы георадиолокации, электротомографии, тепловизионная съемка, электромагнитные зондирования [2-5], в редких случаях, метод ядерно-магнитного резонанса [6], которые позволяют определять толщину льда, глубину сезонного промерзания пород, оконтуривать подрусловые талики и участки разгрузки подземных вод.

В России процессы наледообразования в большей мере проявлены на северо-востоке страны, где наледи могут достигать десятки километров. На юго-западе России наледи образуются реже, преимущественно в горных областях. В Республике Алтай, на 2000-2010 гг они занимают третье место по уровню негативного воздействия на населённые пункты после эрозионных процессов и паводкового подтопления [7].

Изучение наледных образований на территории Республики Алтай осуществляется, в основном, в виде комплекса геоморфологических и климатических измерений и имеет описательный характер [7]. Но на практике, этой информации часто бывает недостаточно для прогнозирования наледообразовательных процессов и определения источников их формирования. В феврале 2023 года, в период максимального промерзания деятельного слоя, нами были выполнены исследования одного из наледных бугров Чуйской впадины методами георадиолокации и бесконтактного измерения электрического поля [8]. Полученные результаты позволили установить, что наледный бугор формируется над вертикальной аномалией пониженного УЭС в коренных породах, интерпретируемой как разломная зона мощностью около 8 м. Летом 2023 года на месте образования изученного зимой наледного бугра были проведены дополнительные исследования с помощью метода электротомографии. Основной геологической задачей являлось выявление каналов разгрузки подземных вод, по которым происходит питание наледи.

### ***Характеристика участка исследования***

Исследуемый участок расположен в Республике Алтай, в Чуйской впадине, на 907 км трассы Р-256 вблизи населённого пункта Тобелер. В геологическом плане участок представлен девонскими и четвертичными флювиогляциальными

отложениями. Согласно гидрологическим схемам объект исследования находится в непосредственной близости к границам распространения современных многолетнемерзлых пород [9]. В период максимального промерзания, в феврале 2023 года, размеры наледного бугра примерно составляли 45 на 30 м при высоте около 2,5 м. Бугор образован в месте разгрузки подземных вод у северо-западного склона горы Мишельдык (1831 м) [8].

По результатам бурения и наблюдений в трещинах наледи было установлено, что максимальная толщина льда на вершине бугра достигала 45 см, хотя в прежние годы по свидетельству М. С. Достоваловой максимальная толщина льда достигала 1.5 метров [7].

### *Методы исследования*

Измерения методом электротомографии выполнены аппаратурой «Скала-64к15». Привязка профиля на местности осуществлялась с помощью прибора Garmin с погрешностью менее 3 м. Сеть наблюдений, включала в себя две серии профилей, расположенных перпендикулярно друг другу. Первая серия разбита вкрест простирания наледного бугра и состоит из 5 профилей, расположенных на расстоянии 5 м друг от друга, длина каждого профиля составляет 155 м. Вторая сеть измерений располагается вкрест простирания контакта между породами палеозойского и кайнозойского возраста и состоит из 5 профилей, длиной 315 м, профили располагаются на расстоянии 20 м друг от друга. Межэлектродное расстояние составляло 5 м (рис. 1.).

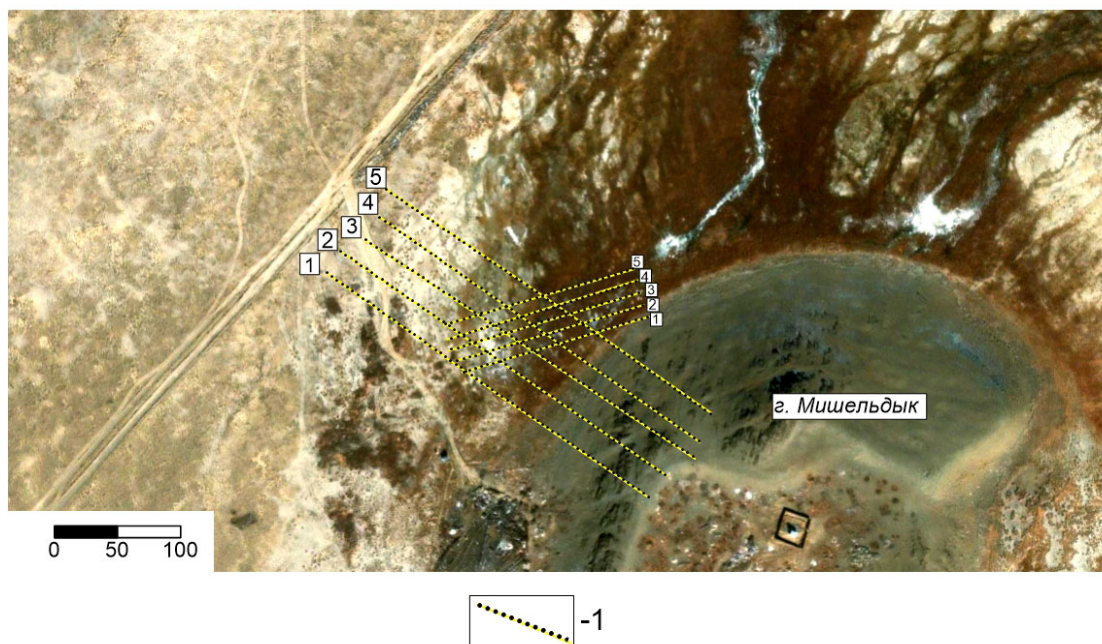


Рис. 1. Схема расположение профилей на участке исследования:  
1 – линия профиля

В качестве электродов использовались стальные штыри длиной 30 см. Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной Шлюмберже, трёхэлектродной прямой и встречной и дипольно-осевой установкам. Решение обратной задачи осуществлялось с помощью программы Res2Dinvx64 методом робастной инверсии в глобальных координатах сети измерений с автоматическими настройками программы.

### **Результаты**

На срезе удельного электрического сопротивления (УЭС) трёхмерной геоэлектрической модели инверсии, многолетнемерзлые породы (ММП) выделяются высокими значениями УЭС – 2500-20000 Ом×м (рис. 2.). Для толщи талых рыхлых осадочных отложений, в свою очередь, характерны пониженные значения УЭС (около 20 Ом×м). Низкие значения УЭС осадочных отложений связаны с их обводнённостью и засоленостью. Зоны разгрузки подземных вод наблюдаются в нескольких местах участка исследования, в том числе в месте образования наледного бугра в зимнее время. Ниже по разрезу залегают породы со значениями УЭС – 1000-2500 Ом×м, интерпретируемые как коренные породы. В них наблюдаются вытянутые аномалии пониженных значений УЭС до 300-700 Ом×м. Такие участки являются зонами повышенной трещиноватости, через которые осуществляется питание наледного бугра в холодное время года.

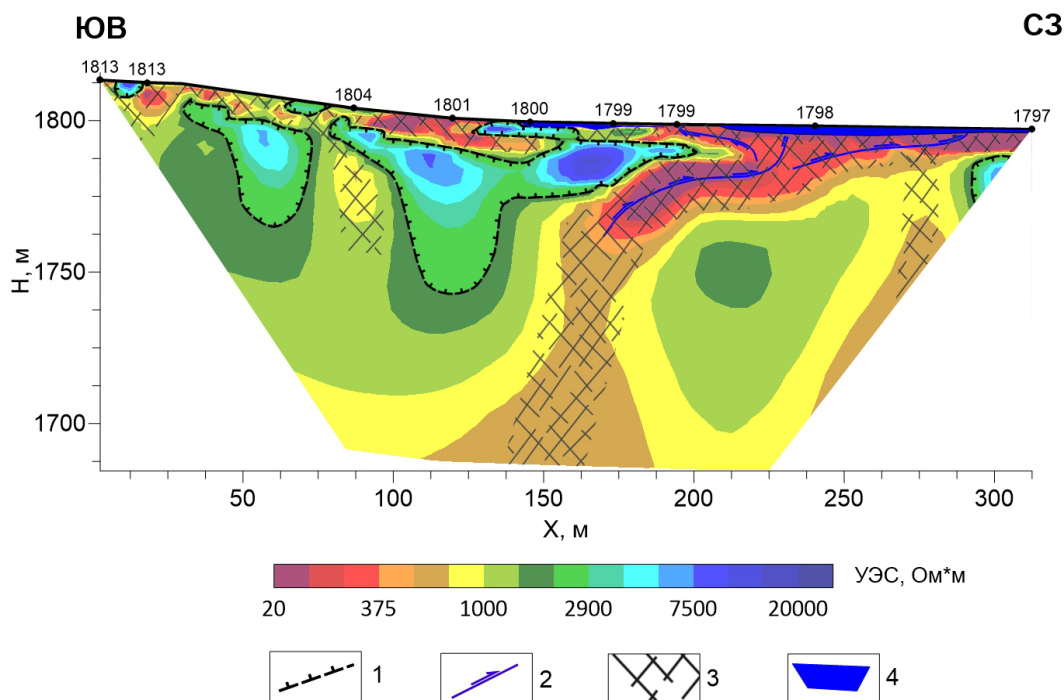


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по профилю № 4 по данными электротомографии с элементами интерпретации: 1 – граница ММП; 2 – направление течения воды; 3 – трещиноватые породы; 4 – вода и сильно обводненные рыхлые породы

На трехмерной геоэлектрической модели, построенной по результатам 3D инверсии, в верхней части разреза выделяется область пониженных значений УЭС 50-300 Ом·м, мощность которой уменьшается с уменьшением глубины. Эта область является каналом, по которому происходит активная разгрузка подземных вод на дневную поверхность (рис.3).

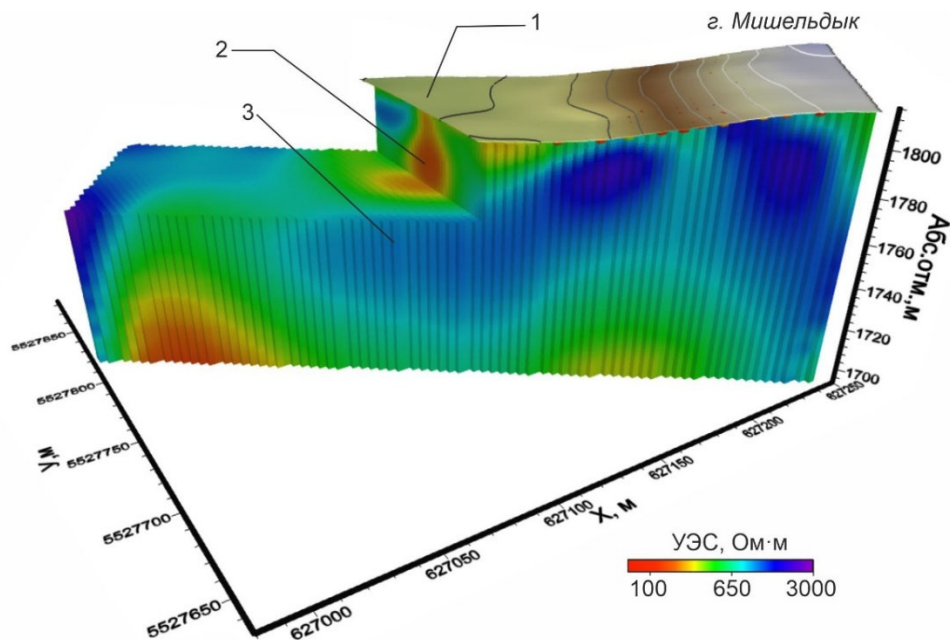


Рис. 3. Трехмерная геоэлектрическая модель, по данным электротомографии: 1 – канал разгрузки подземных вод; 2 – обводненная зона трещиноватости; 3 – многолетнемерзлые породы

### Обсуждение

По данным электротомографии выделяется три зоны пониженного УЭС, которые мы интерпретируем как зоны повышенной трещиноватости палеозойских отложений. Низкое УЭС одной из зон мы связываем с ее активным обводнением минерализованными растворами, поступающими из глубины. В зимнее время над этой зоной из трещины в центре бугра осуществлялась активная разгрузка подземных вод [8].

Канал разгрузки подземных вод, который мы наблюдаем на трехмерной модели, построенной по результатам 3D инверсии, по форме идентичен аномалии пониженного сопротивления УЭС, на геоэлектрическом разрезе, выполненном по данным БИЭП в феврале 2023 года (рис. 4.). Тогда предполагалось, что зоны повышенного УЭС – это коренные породы, а область пониженного УЭС, с горизонтальной мощностью 8 м – разломная зона. Последующие исследования методом электротомографии позволили получить информацию для большей глубины (около 120 м) и подтвердили гипотезу о положении разломной зоны и её связи с процессами наледообразования. Стоит отметить, что выделенный канал разгрузки формирует в слое ММП сквозной талик.



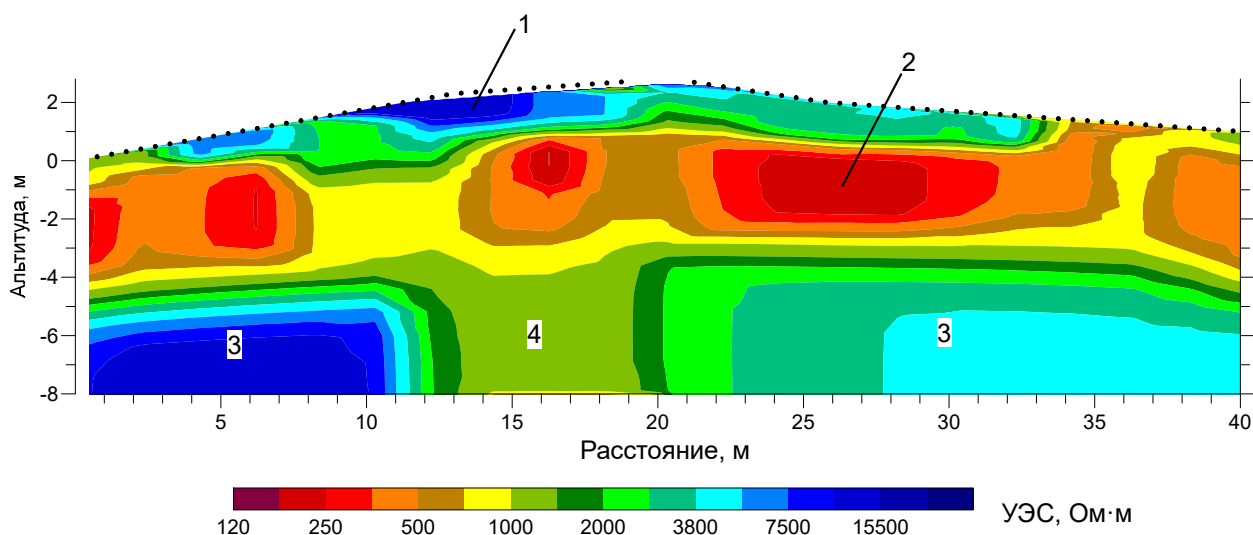


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю № 8 по данными БИЭП: 1 – сезонномерзлые породы и лёд; 2 – рыхлые талые породы с минерализованной поровой водой; 3 – коренные породы; 4 – предполагаемая зона разлома

Результаты геофизических исследований доказывают, что питание наледи, главным образом, осуществляется за счет подземных вод, а в качестве питающих каналов выступают разломные зоны.

### *Заключение*

В результате исследования было подтверждено предположение о глубинной природе минеральных вод, питающих наледный бугор. Выявлено три крупных обводненных разлома, вода по которым активно перемещается к дневной поверхности, образуя болота летом и наледи зимой.

### *Благодарности*

Исследования выполнены при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) № FWZZ-2022-0024.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 116.13330.2012. Свод правил. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003
2. Liu Y. et al. Material strategies for ice accretion prevention and easy removal // ACS Materials Letters. – 2021. – Vol. 4. – № 2. – P. 246-262.
3. Землянскова А. А. и др. Геофизические исследования на Анмангындинской наледи 2021-2022 г // Материалы XII Международной школы по наукам о Земле имени профессора Л.Л. Перчука (Петропавловск-Камчатский, 07-19 сентября 2022 года). – Петропавловск-Камчатский : Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2022. – С. 43.
4. Оленченко В. В. и др. Результаты георадиолокационных и электрических зондирований гигантской наледи подземных вод на р. Анмангында (Магаданская область) // Мониторинг в криолитозоне: Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России (Москва, 14-17 июня 2022 года). – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. – С. 420-426.

5. Потапов В. В., Макарьева О. М., Оленченко В. В. Геоэлектрическое строение разреза на Анмангындинской наледи (Магаданская область) по данным метода ЗСБ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология" : Материалы XVIII международной научной конференции (Новосибирск, 18-20 мая 2022 г.). – Новосибирск : ИНГГ СО РАН, 2022. – Т. 2. – № 3. – С. 59-65.

6. Terry N. et al. Seasonal subsurface thaw dynamics of an aufeis feature inferred from geophysical methods // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2020. – Vol. 125. – № 3. – P. e2019JF005345.

7. Достовалова М. С., Шитов А. В. Влияние метеорологических характеристик и геодинамической активности на режим образования гидрогенных наледей Горного Алтая // ГеоРиск. – 2011. – № 4. – С. 36-43.

8. Медведева М. В., Заплавнова А. А., Оленченко В. В. Геоэлектрическая характеристика участка образования наледного бугра в Чуйской впадине (Горный Алтай) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология" : Материалы XIX международной научной конференции (Новосибирск, 17-19 мая 2023 г.). – Новосибирск : ИНГГ СО РАН, 2023. – Т. 8. – С. 218-223.

9. Городецкая Я. О., Шахматова Е. Н. Геологическая карта Республики Алтай, лист М-45-XXIII – 1963.

© М. В. Медведева, А. А. Заплавнова, В. В. Оленченко, 2024