

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

## **Геоэлектрическая характеристика участка образования наледного бугра в Чуйской впадине (Горный Алтай)**

<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.** Наледообразование является опасным инженерно-геологическим процессом. Изучение источников питания наледей имеет важное как фундаментальное, так и прикладное значение. На примере наледного бугра в Чуйской впадине Горного Алтая была показана эффективность комплексного применения методов бесконтактного измерения электрического поля и георадиолокации. По данным георадиолокации установлено, что глубина сезонного промерзания достигает 2.5-3 м, при этом выявлены локальные участки сокращения глубины промерзания до 1-0 м над каналами разгрузки подземных вод. Показано, что в границах бугра пучения подземные воды разгружаются по нескольким каналам. Результаты электрических зондирований показали, что наледный бугор формируется над вертикальной аномалией пониженного сопротивления, интерпретируемой как разломная зона. При этом подземные воды разломной зоны имеют меньшую электропроводность, чем воды перекрывающих рыхлых отложений. Это доказано прямыми измерениями электропроводности воды из каналов разгрузки и анализом сопротивления пород в разрезе.

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

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

## **Geoelectrical features of the icing blister formation area in the Chuysk depression (Mount Altai)**

<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 formation is a dangerous engineering and geological process. The icing supply sources is the study of the great importance, both fundamental and engineering. On the example of the icing blister in the Chuysk depression of Mount Altai region was revealed the effectiveness for integrated methods application of non-contact field measurement and ground penetrating radar. According to ground penetrating radar data, was found that the seasonal freezing depth decreases by 2.5–3 m. Also local areas of decrease in seasonal freezing depth to 1–0 m above groundwater discharge flows were identified. Was shown that in the pingo area groundwater is discharged through a few channels. The electrical sounding results showed that the icing blister was formed above the vertical anomaly of the decreased resistance, interpreted as a fault zone. At the same time, the groundwater in the fault zone has a lower electrical conductivity than the water in the overlying incoherent deposits. This was revealed by electrical conductivity direct measurements of the water from discharge flows and by rock resistance analysis in the cross-section.

**Keywords:** aufeis, icing blister, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar

## ***Введение***

Наледь – это слоистый ледяной массив на поверхности земли, образовавшийся при замерзании периодически изливающихся подземных или речных вод [1]. Наледообразование является опасным инженерно-геологическим процессом, влияющими на эксплуатацию жилых и нежилых зданий и инженерных сооружений. Для разработки противоналедных мероприятий в конкретной мерзлотно-гидрогеологической обстановке необходимо проведение инженерно-геологических изысканий [1], в том числе геофизических исследований.

При исследовании строения участков образования наледей применяются методы георадиолокации, электротомографии с гальваническими и емкостными заземлениями, тепловизионная съемка, электромагнитные зондирования [25], а в некоторых случаях метод ядерно-магнитного резонанса [6]. Геофизические методы применяются для определения толщины льда, глубины сезонного промерзания пород под наледью, оконтуривания подрусловых таликов и выявления участков субаквальной разгрузки подземных вод из аллювиальных отложений.

На территории Республики Алтай наиболее активное наледообразование происходит на территории населенных пунктов Кош-Агачского и Шебалинского районов [7]. По результатам мониторинговых работ по изучению наледных процессов на территории Республики Алтай в 2000-2010 гг. установлено, что по уровню негативного воздействия на населённые пункты наледи занимают третье место после эрозионных процессов и подтопления [8].

В Чуйской впадине Горного Алтая развиваются гидрогенные и геогенные наледи. Причём источником питания геогенных наледей могут быть воды сезонноталого слоя, рассредоточенные выходы подземных вод с возникновением заболачивания и солончаков, высокодебитные родники восходящего типа и самоизливающиеся водозаборные скважины [8].

Мы провели электроразведочные исследования в пределах участка образования одного из наледных бугров в Чуйской впадине с целью определения его геоэлектрического строения. Наледные воды из этого бугра и соседних родников питают наледь, которая формируется вдоль федеральной автодороги Р-256, км 907. Геологическими задачами были: определение толщины льда, глубины сезонного промерзания и выявление канала разгрузки подземных вод.

### ***Характеристика объекта исследований***

Наледный бугор примерными размерами 45 на 30 м и высотой около 2,5 м образован в месте разгрузки подземных вод у северо-западного склона горы Мишельдык (1831 м).

Из трещины в вершине бугра происходила разгрузка подземных вод. С помощью прибора СОМ-300 были определены свойства воды. Минерализация воды составила 287 ppm(0.5), рН. – 9.4, а электропроводность – 600 мкСм/м, что в пересчете на удельное электрическое сопротивление составляет 167 Ом·м. Однако в 30-50 м в стороне от бугра были обнаружены выходы подземных вод с электропроводностью до 1800 мкСм/м (5.5 Ом·м).

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.

### *Методы исследования*

Изучение строения наледного бугра выполнялась комплексом методов бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП) и георадиолокационного зондирования.

Георадиолокационное зондирование (ГРЛЗ) было выполнено аппаратурой ОКО-2 с антенными блоками центральной частоты 250 МГц по 13 профилям длиной по 40 м, расположенным на расстоянии 1 м друг от друга. Обработка данных проводилась с помощью программы GeoScan32. При пересчёте временных разрезов в глубинные использовалась диэлектрическая проницаемость (ДП) сезонномерзлого слоя, равная 4. По гиперболам дифракции определена ДП подстилающего слоя, равная 20. Диэлектрическая проницаемость основания (скальные породы) принята равной 6.

Многоразносное профилирование методом БИЭП проведено с помощью аппаратуры ВЕГА по трем профилям, расположенным на расстоянии 3 м друг от друга. Профили БИЭП проходили вдоль профилей ГРЛЗ № 5, 8, 11. Длина диполей АВ и MN составила 5 м, а разносы ОО' составляли 5, 10, 15 и 20 м. Установка перемещалась вдоль профиля с шагом 2 м. Обработка данных выполнялась с помощью программ Res2Dinv и Res3Dinv.

### *Результаты*

На георадиолокационных разрезах контрастно выделяются отражающие границы между тремя литологическими комплексами: сезонно-мерзлый слой (СМС), рыхлые осадочные отложения, скальные породы (рис. 1). Глубина сезонного промерзания изменяется в пределах 1.0-2.7 м. В центральной части наледного бугра наблюдаются интенсивные гиперболы дифракции от трещин и высокоамплитудная аномалия от канала разгрузки подземных вод (ПВ).

На разрезе УЭС по результатам 2D инверсии сезонно-мерзлый слой и лёд выделяется повышенными значениями УЭС – 3000-15000 Ом·м (рис. 2). Слой рыхлых осадочных отложений в талом состоянии отмечается пониженными значениями УЭС – 100-300 Ом·м. Вероятно, этот слой содержит минерализованные поровые растворы, выходы которых были обнаружены недалеко от бугра. Ниже по разрезу выделяются высокоомные породы, интерпретируемые как коренной цоколь.

В коренных породах под куполом бугра выделяется зона понижения УЭС до 1000 Ом·м – предполагаемая зона разлома, по которой разгружаются подземные воды.

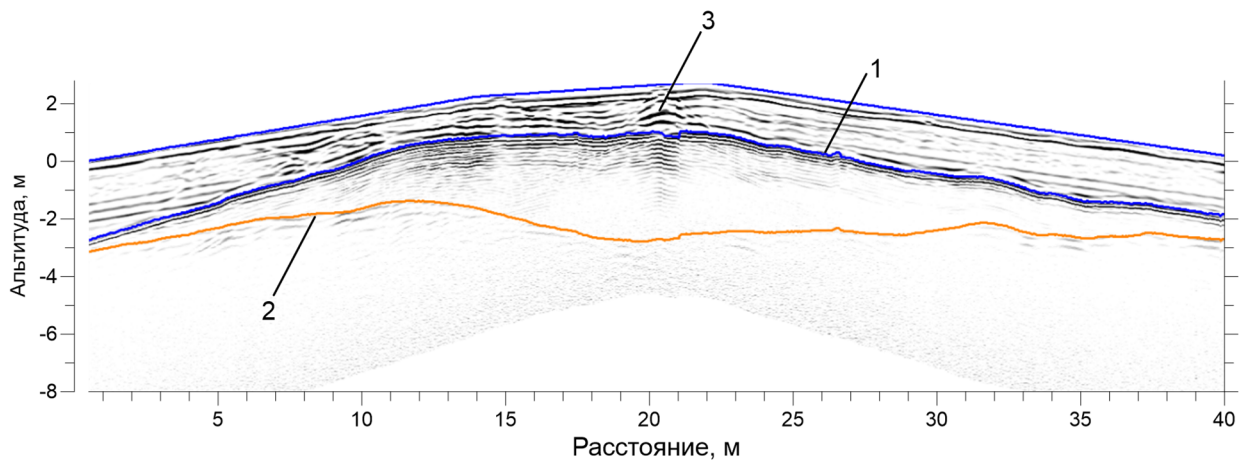


Рис. 1. Радарограмма по профилю № 8 через наледный бугор: 1 – граница сезонного промерзания; 2 – кровля коренных пород; 3 – канал разгрузки подземных вод

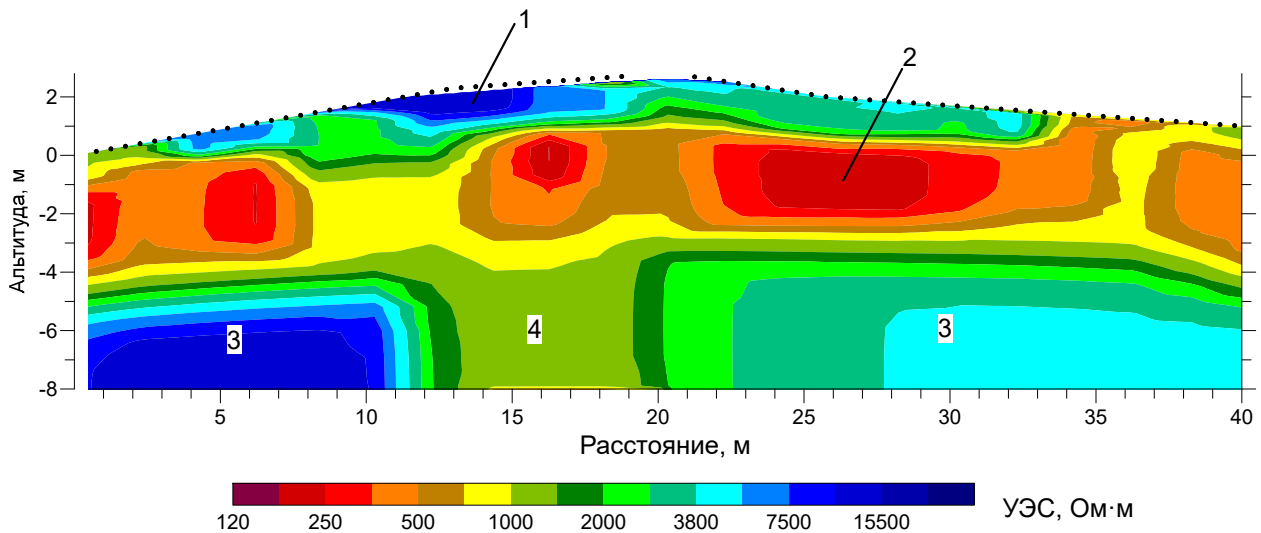


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по профилю № 8 по данным БИЭП: 1 – сезонномерзлые породы и лёд; 2 – рыхлые талые породы с минерализованной поровой водой; 3 – коренные породы; 4 – предполагаемая зона разлома

### Обсуждение

Удельное электрическое сопротивление сезонно-мерзлого слоя неоднородно и значительно понижается на флангах наледного бугра (рис. 2), что означает засоленность пород на этих участках профиля. Рыхлые осадочные породы в основании бугра имеют низкое УЭС, что мы связываем с высокой минерализацией поровых растворов. По данным БИЭП кровля коренных пород залегает глубже, чем отражающая граница по данным ГРЛЗ. Такое несоответствие глубины залегания кровли коренных пород по данным двух методов может быть связано как с неучётом латерального изменения диэлектрической проницаемости во втором слое, так и с влиянием эквивалентности при подборе резистивной модели. При этом закрепление положения границы, установленной по данным

ГРЛЗ, в стартовой двумерной геоэлектрической модели не привело к улучшению результатов инверсии.

Мы полагаем, что разгрузка подземных вод по разлому приводит к образованию бугра пучения. Разломная зона выделяется областью пониженного УЭС в коренных породах горизонтальной мощностью порядка 8 м.

По данным площадных ГРЛЗ была построена карта глубины сезонного промерзания пород в пределах наледного бугра (рис. 3). Локальные участки уменьшения глубины сезонного промерзания связаны с каналами разгрузки подземных вод. Аналогичный эффект отмечен на наледи р. Анмангында в Магаданской области [3, 4].

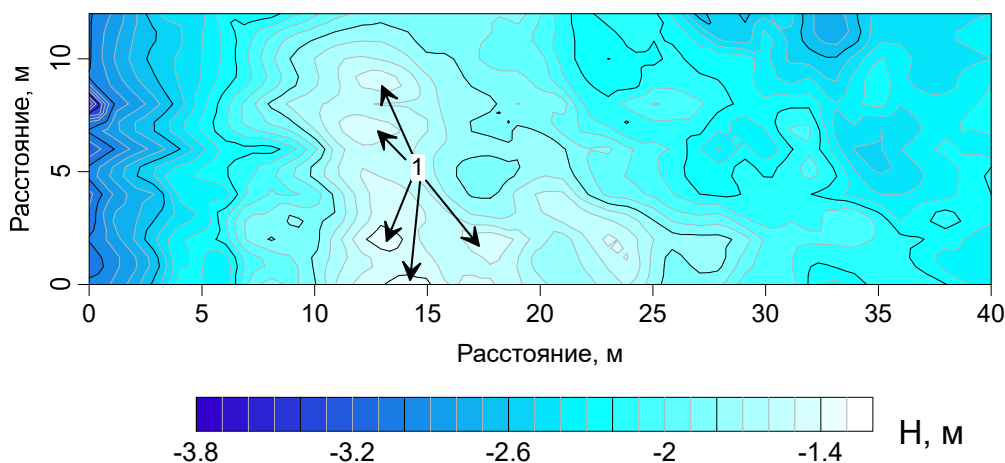


Рис. 3. Карта глубины сезонного промерзания пород по данным ГРЛЗ:  
1 – локальные участки уменьшения глубины СМС над каналами разгрузки подземных вод

На карте глубины сезонного промерзания пород хорошо заметно, что разгрузка подземных вод происходит по нескольким каналам. При этом минерализация наледных вод невысокая по сравнению с водами перекрывающих рыхлых отложений, что подтверждается прямыми замерами кондуктометром и распределением УЭС пород в разрезе по данным БИЭП. Ранее считалось, что повышенная минерализация является признаком глубинных вод [8]. Однако по нашим данным в зоне разлома подземные воды имеют относительно невысокую минерализацию (287 ppm (0.5)) и УЭС порядка 160 Ом·м, что в 30 раз выше, чем УЭС воды местных солончаков.

### *Заключение*

В результате исследований было установлено, что наледный бугор формируется над вертикальной аномалией пониженного УЭС в коренных породах, интерпретируемой как разломная зона мощностью около 8 м.

Рыхлые породы, подстилающие бугор, имеют пониженное УЭС, связанное с их засоленностью. Этот вывод подтверждается замерами электропроводности воды из источников в 30-50 м в стороне от наледного бугра.

Георадиолокация показала, что разгрузка подземных вод в бугре происходит по нескольким каналам. При этом электропроводность этой воды низкая, по сравнению с водами засоленных отложений верхней части разреза.

### *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. – Т. 4. – №. 2. – P. 246-262.
3. Землянкова 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 (ISES-2022) (г. Петропавловск-Камчатский, 07–19 сентября 2022 г.)*: – Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2022. – С. 43
4. Оленченко В. В., Макарьева О. М., Данилов К. П., Осташов А. А., Калганов А. С., Землянкова А. А., Христофоров И.И., Нестерова Н. В. Результаты георадиолокационных и электрических зондирований гигантской наледи подземных вод на р. Анмангында (Магаданская область) // *Мониторинг в криолитозоне: Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов (г. Москва, 14–17 июня 2022 г.)*: – 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 (г. 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. – Т. 125. – №.3. – P. e2019JF005345.
7. Журавлева О. В., Сухова М. Г., Чернова Е.О. Опасные гидрологические явления на территории республики Алтай // *Материалы международной научно-практической конференции, посвященной столетию заповедной системы России «Природа, культура и устойчивое развитие Алтайского трансграничного региона» (г. Усть-Кокса, 23–26 ноября 2017 г.)*: – Горно-Алтайск: Горно-Алтайский государственный университет, 2017. – С. 70-74.
8. 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.

© М. В. Медведева, А. А. Заплавнова, В. В. Оленченко, 2023