

Строение каменного глетчера Суковского обвала (Горный Алтай) по данным электротомографии

А.А.Лапковская, В.В.Оленченко, В.В.Потапов, А.Н.Шейн, Е.С.Горностаева, Д.И.Губин
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Реферат

Представлены результаты исследований строения одного из каменных глетчеров Горного Алтая методом электротомографии. В результате исследований установлено, что разновозрастные генерации каменных глетчеров отличаются по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) ледяных ядер. Для наиболее древней генерации глетчера характерны самые низкие УЭС льда (80000-160000 Ом·м). Самая молодая генерация каменного глетчера характеризуется очень высоким УЭС (250000-820000 Ом·м). По известной зависимости УЭС ледникового льда от температуры сделана оценка температуры ледяных ядер. У глетчера старой генерации температура льда от минус 0,6 до минус 1,0 °С, у активного глетчера молодой генерации – минус 1,9 °С. Сделан вывод, что метод электротомографии не позволяет однозначно определить толщину ледяного тела глетчера в силу экранирующего эффекта.

Ключевые слова: Горный Алтай; каменный глетчер; лёд; многолетнемёрзлые породы; электротомография

The Structure of the Rock Glaciers Sukorsky Collapse (Gorny Altai) According Electrical Resistivity Tomography

A.A.Lapkovskaya, V.V. Olenchenko, V.V.Potapov, A.N.Shein, E.S.Gornostaeva, D.I.Gubin
Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk

Abstract

Inversion and interpretation of electrical resistivity tomography (ERT) data of a rock glacier in Altai Mountains are presented. It was shown that there were three generations of rock glaciers, which sediments were divided according to the difference in electrical resistivity of ice nuclei. For the most ancient generation of rock glacier is characteristic values the lowest electrical resistance of ice (80000-160000 Ohm-m). The youngest generation of rock glacier was characterized by very high electrical resistance (250000-820000 Ohm-m). With the help of the known dependence of the electrical resistance of rock glacier ice on the temperature the estimate of the temperature of ice nuclei was made. The rock glacier of the old generation had an ice temperature of minus 0.6 - minus 1.0 °C, while the active glacier of the young generation had - minus 1.9 °C. Electrical resistivity tomography could not allow us to determine the thickness of the ice body of the glacier due to the masking effect.

Key Words: Altai Mountains; electrical resistivity tomography; ice; permafrost; rock glaciers;

Введение

Каменные глетчеры широко распространены на территории Горного Алтая [Останин 2013]. Согласно определению, они представляют собой стратифицированные (слоистые) сцементированные конгломератным льдом грубообломочные образования, имеющие вид языков, лопастей и террасовидных шлейфов со слабонаклонной поверхностью и крутым фронтальным уступом, способные к монолитному пластическому течению путем деформации содержащегося в них льда. Каменные глетчеры формируются в пределах криолитозоны в результате промерзания ледниковых и коллювиальных отложений, но в отличие от настоящих ледников, имеют преобладающее обломочное питание, не проявляют жесткой связи со снеговой границей, но подчиняются морфоклиматической зональности и поясности [Галанин 2009].

Исследования каменных глетчеров связаны с вопросами их генезиса, разработкой теоретических

представлений о механизмах их формирования, палеогеографических и палеосейсмогеологических реконструкций, проектирования строительства, экологических обоснований и прогноза чрезвычайных ситуаций [Галанин 2009]. Кроме того, каменные глетчеры могут рассматриваться как законсервированные источники пресной воды.

Процесс изучения каменных глетчеров сопряжен с определёнными трудностями, связанными с практически невозможным проведением горно-буровых работ или проходке шурфов в теле глетчеров. В связи с этим современные представления о внутреннем строении глетчеров основаны на умозрительных заключениях и на редких наблюдениях естественных обнажений разрезов глетчеров в маргинальных каналах, сейсморазрывах или провалах.

В зарубежной практике гляциальных исследований (в Европе, Южной Америке, Антарктиде) для изучения внутреннего строения каменных глетчеров активно применяются геофизические методы [Farbrøt et al. 2005, Francou et al. 1999, Hassinger & Mayewski 1983, Hilbich et



al. 2009, Maurer & Auck 2007, Onaca et al. 2011]. Электротомография [Loke 2009] является одним из ведущих методов при изучении каменных глетчеров и часто применяется в комплексе с георадиолокацией или сейсморазведкой на преломлённых волнах.

В тоже время нам не известны результаты исследований каменных глетчеров на территории России, выполненные с использованием геофизических методов. В данной работе впервые представлены результаты исследований с применением метода электротомографии на территории Горного Алтая.

Характеристика объекта исследований

Район исследований расположен в Кош-Агачском районе республики Алтай. Участок исследований находится между Курайской и Чуйской степями, на Чаган-Узунском блоке, у подножия горы Сукор (абс. 2926 м).

Учаток расположен в поясе прерывистого распространения многолетнемерзлых пород (ММП) [Шац 1978]. Мощность ММП на абсолютной высоте 2900 достигает 350-400 м, значение температуры на склоне северной экспозиции составляет минус 5 °С. По данным геотермических наблюдений 1970-1973 годов в 4 км к юго-западу от с. Чаган-Узун (абс. 1830 м) среднегодовая температура воздуха составляет около минус 3 °С, при этом температура многолетнемерзлых пород порядка минус 0,5 °С [Шац 1978].

В геологическом строении территории участвуют баратальская свита, представленная известняками, доломитами и силицитами, а также арыджанская свита, включающая в основном вулканогенный, лавовый материал: пиллоу-лавы базальтов, сланцы.

Северный склон г. Сукор представляет собой цирк, который рассматривается как палеосейсмодислокация в которой сформировался оползень-обвал [Деев и др. 2012]. Внутренняя часть цирка заполнена обвальными осипными отложениями, состоящими из глыб, валунов, щебня, предполагаемой мощностью 70-100 метров. Внутри цирка располагается несколько каменных глетчеров различных генераций (рис. 1а).

Наиболее старые генерации расположены в нижней части цирка, они покрыты лесом и на их поверхности развиты глубокие ниши вытаивания. Самая молодая генерация расположена в центральной части цирка у подножия стенки отрыва. На поверхности молодого глетчера в краевых частях растут одиночные деревья, формируя, из-за подвижек поверхности, «пьяный» редкий лес. В центральной части растительности практически нет, встречаются одиночные молодые деревца сосны и лиственницы высотой около 1,5 м и кусты багульника. На поверхности развиты напорные валы из крупных валунов и ниши вытаивания.

Фронтальные уступы каменных глетчеров (как молодых, так и старых) очень крутые, что является признаком ледяного ядра внутри. По краям глетчеров в маргинальных каналах текут небольшие ручьи, источником которых, вероятно, является тающий глетчерный лёд.

Основной профиль электрических зондирований начинался в долине р. Чуя (абс. 1723 м) и поднимался вверх, пересекая несколько разновозрастных генераций глетчера до высоты 2005 м. Дополнительный профиль проходил вкост основного профиля (рис. 1б).

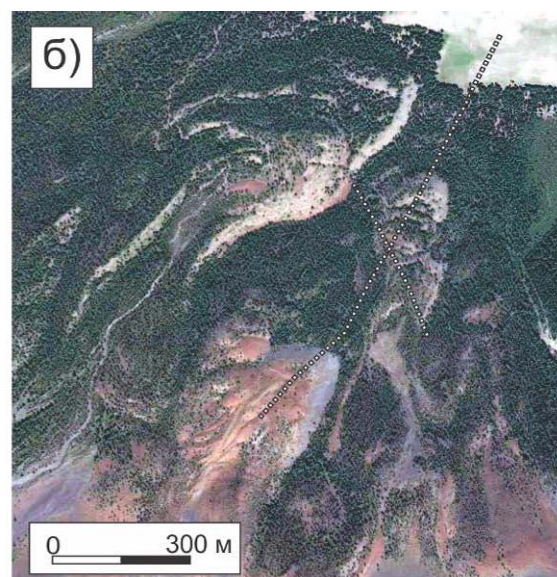
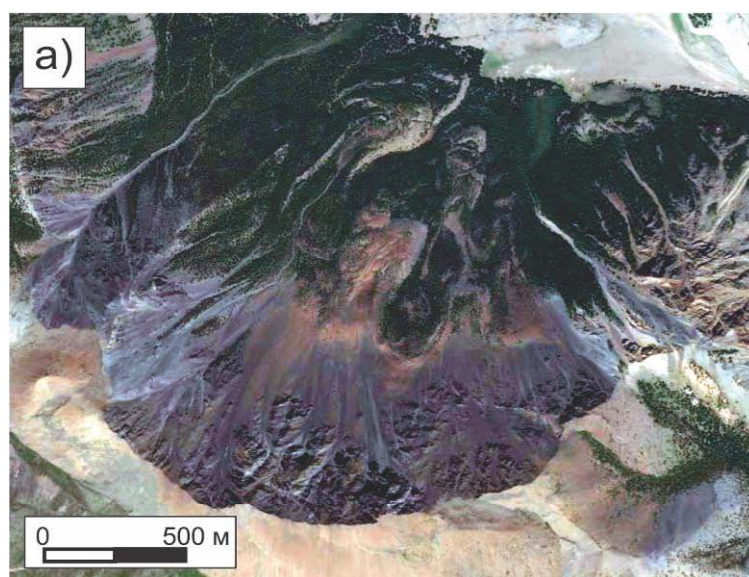


Рис. 1. Космоснимок Сукорского обвала (а) и каменных глетчеров в цирке (б).
Пунктирной линией показаны профили электротомографии



Методика исследований

Электрические зондирования выполнялись по технологии электротомографии (ЭТ). Измерения проводились многоэлектродной электроразведочной станцией «СКАЛА-48» [Балков 2012].

Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже ($AB_{\max}=235$ м) и трёхэлектродной (поле-диполь) прямой и встречной установкам ($AO_{\max}=215$ м). Шаг измерений по профилю составлял 5 м. Максимальная глубинность исследований составила 80 м.

Устройство заземлений на поверхности глетчеров осуществлялось с подливом солёной воды, что позволяло значительно снизить сопротивления заземлений до приемлемых значений (с первых сотен до первых десятков кОм). Сила тока в питающей линии АВ при измерении трёхэлектродными установками составляла 2-20 мА, напряжение на питающих электродах - 50-5000 мВ.

Инверсия данных зондирования осуществлялась в рамках двумерных моделей с учётом рельефа с помощью программы Res2Dinv [Loke 2009]. На основе полученных результатов были построены геоэлектрические разрезы по профилям и проведена их геологическая интерпретация.

Результаты

На рис. 2 представлен геоэлектрический разрез вдоль основного профиля. В нижней части профиля у подножья цирка в разрезе выделяются талые флювиогляциальные отложения, характеризующиеся удельным электрическим сопротивлением (УЭС) 160-400 Ом·м. Здесь же в верхней части разреза отмечается горизонт высокого УЭС (2500-3000 Ом·м) мощностью 6-8 м, интерпретируемый как

высокотемпературная многолетнемёрзлая толща (ММТ). Согласно известной [СП 2004] зависимости УЭС рыхлых пород от литологического состава, эти породы представлены песками и песчано-гравийной смесью, а температура мёрзлой толщи составляет порядка минус 0,2°C.

В разрезе каменного глетчера I (интервал профиля 450-600 м) выделяются три локальных аномалии с УЭС 80000-160000 Ом·м. Эти аномалии связаны с ледяными ядрами в теле глетчера. Ядро с УЭС 80000 Ом·м располагается ближе к фронтальной части уступа и представляет собой «тёплый» лёд. Такое УЭС соответствует температуре льда минус 0,6 °C [Фролов 1998]. Каменный глетчер I – это наиболее старая генерация. На разрезе хорошо видно, что ледяные ядра залегают глубоко (10-12 м), они находятся в стадии деградации, что выражается в появлении на поверхности глетчера глубоких ниш протаивания.

Аномалией высокого УЭС (около 400000 Ом·м) в интервале профиля 600-700 м в разрезе выделяется каменный глетчер II. Отсутствие растительности на поверхности этого глетчера, характерные наплывные формы микрорельефа, крутые фронтальные и боковые уступы, а также высокое электрическое сопротивление ядра говорят о том, что этот глетчер находится в активной стадии, в процессе движения по склону.

Выше по склону (интервал 700-1000 м) профиль проходит по обвально-осыпным отложениям цирка. Здесь в верхней части разреза выделяется слой пониженного (2000-3000 Ом·м) УЭС мощностью до 2,5 м, который соответствует сезонно-талому слою. Ниже залегает горизонт пород с сопротивлением 5000-30000 Ом·м мощностью 20-25 м, интерпретируемый как слой многолетнемёрзлых пород.

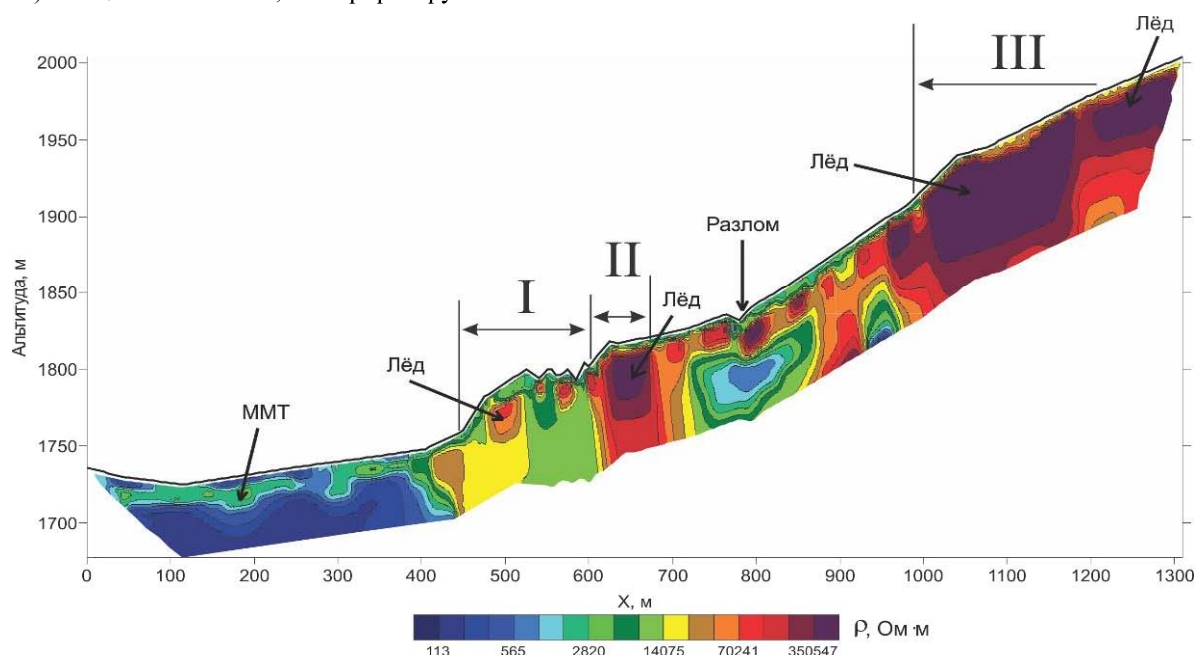


Рис.2. Геоэлектрический разрез по основному профилю. Римскими цифрами отмечены тела каменных глетчеров разных генераций

Этот слой содержит ядра высокольдистых грунтов или чистого льда, которые выделяются локальными аномалиями УЭС 150000-400000 Ом·м.

Разломная зона, выраженная в рельефе сейсмическим рвом в районе 800 м, отображается на геоэлектрическом разрезе областью пониженного сопротивления, что мы связываем с обводнённостью тектонического нарушения.

В верхней части профиля (интервал 1000-1300 м) разрез характеризуется исключительно высоким удельным электрическим сопротивлением 250000-820000 Ом·м. Здесь профиль пересекает самую молодую генерацию каменного глетчера, активную в настоящее время.

По данным ЭТ кровля ледяного тела каменного глетчера I залегает на глубине 4-5 м. В среднем УЭС льда здесь составляет около 400000 Ом·м, что по зависимости [Фролов 1998] соответствует температуре минус 1,9 °С.

В силу особенностей метода электротомографии, из-за эффекта экранирования электрического тока, нам не удалось однозначно определить мощность ледяных ядер в каменных глетчерах молодой генерации. По аномально высокому УЭС мы можем только установить наличие льда в теле глетчера, определить глубину залегания верхней кромки, но установить его нижнюю границу и определить толщину льда по данным ЭТ не представляется возможным.

Для решения данной проблемы необходимо привлечение дополнительных методов. Одним из таких методов может быть георадиолокация, основанная на различии сред по диэлектрической проницаемости.

Выводы

В результате исследований установлено, что лёд внутри каменных глетчеров разновозрастных генераций различается по удельному электрическому сопротивлению.

У глетчера поздней генерации ледяное ядро залегает глубоко (10-12 м) и обладает относительно низким УЭС (80000-160000 Ом·м). По известной зависимости УЭС ледникового льда от температуры предполагается, что температура внутри старого глетчера составляет от минус 0,6 до минус 1,0 °С.

В активных глетчерах молодой генерации УЭС ледяного ядра достигает 820000 Ом·м при модальных значениях 398000 Ом·м. При таких УЭС температура льда должна составлять минус 1,9 °С.

Для более точного определения глубины залегания кровли льда и установления его мощности необходимо провести георадиолокационные зондирования. По характеру волновой картины можно будет также оценить количество обломочного материала в ледяном ядре глетчера.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 14-05-00435 А «Строение и динамика горной криолитозоны, ледников и каменных глетчеров Центральной и Северо-Восточной Азии в позднем голоцене».

Литература

- Балков, Е. В., Панин, Г. Л., Манштейн, Ю. А., Манштейн, А. К., Белобородов, В. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. - 2012. - №6. - С. 54-63.
- Галанин, А. А. Каменные глетчеры — особый тип современного горного оледенения северо-востока Азии // Вестник ДВО РАН. - 2005. - № 5. — С. 59-70.
- Галанин, А. А. Каменные глетчеры северо-востока России: строение, генезис, возраст, географический анализ. / А. А. Галанин // Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук / СВНЦ ДВО РАН. - 2009. - С. 35.
- Деев, Е. В., Зольников, И. Д., Староверов, В. Н. 2012. Отражение быстрых геологических процессов в отложениях и текстурах (на примере разновозрастных комплексов Северной Евразии) // Литосфера. — 2012. - № 6 - С. 14–35.
- СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. «Правила производства геофизических исследований» / Госстрой России. - М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России. 2004.- 53 с.
- Фролов, А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. / А. Д. Фролов — Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. - 515 с.
- Шац, М.М. Геокриологические условия Алтае-Саянской горной страны. / М.М. Шац. - Новосибирск: «Наука», 1978. — 103 с.
- Farbrot, H., Isaksen, K., Eiken, T., Kaab, A. & Sollid, J.L. 2005. Composition and internal structures of a rock glacier on the strandflat of western Spitsbergen, Svalbard // Norsk Geografisk Tidsskrift—Norwegian Journal of Geography Vol. 59, 139–148. Oslo.
- Hassinger, J.M. & Mayewski, P.A. 1983. Morphology and dynamics of the rock glaciers in Southern Victoria Land, Antarctica // Arctic and Alpine Res., 1983, vol. 15, No. 3, p. 351–368.
- Hilbich, C., Marescot, L., Hauck, C., Loke, M. H. & Mausbacher, R. 2009. Applicability of Electrical Resistivity Tomography Monitoring to Coarse Blocky and Ice-rich Permafrost Landforms.
- Loke, M.H. 2009, Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, RES2DINV Manual, IRIS Instruments.
- Maurer, H. & Auck, C. 2007. Instruments and Methods Geophysical imaging of alpine rock glaciers // Journal of Glaciology, Vol. 53, No. 180, 2007
- Onaca, A.I., Urdea, P., Torok-Oance, M.F & Ardelean, F-M. 2011. Electrical resistivity measurements in sensitive periglacial environment from Southern Carpathians (Romania) / Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, Volume 22, No. 1.