

В. В. Оленченко^{1✉}, А. А. Заплавнова¹

Объёмная геоэлектрическая модель канала питания гидрогеогенной наледи

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: olenchenkovv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Наледи оказывают негативное влияние на мосты и насыпи автомобильных дорог, вызывают подтопление территории жилых зданий и инженерных сооружений. Для того чтобы спланировать местоположение устьев водопонижающих или перехватывающих скважин при планировании противоналедных мероприятий необходимо установить положение их источника. Эта задача решается с помощью метода электротомографии и построения объёмной геоэлектрической модели. Мы провели исследования на участке развития гидрогеогенной наледи в Горном Алтае с целью построения объёмной геоэлектрической модели участка разгрузки наледных вод. В результате была получена 3D модель распределения электрического сопротивления и выделены аномалии, связанные с мёрзлыми породами и каналами фильтрации. Но еще более однозначное выделение канала питания гидрогеогенной наледи стало возможным по аномалии нормированной заряжаемости. Мы предположили, что природа интенсивных аномалий нормированной заряжаемости связана с её квадратичной зависимостью от электрической извилистости пор, которая уменьшается вследствие выноса мелких частиц из трещин и пор потоком воды.

Ключевые слова: гидрогеогенная наледь, разгрузка подземных вод, электротомография, нормированная заряжаемость

V. V. Olenchenko^{1✉}, A. A. Zaplavnova¹

The feeding channel 3D geoelectric model of a hydrogeogenic icing

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: olenchenkovv@ipgg.sbras.ru

Abstract. Icing adversely affects bridges, road embankments, and infrastructure, leading to waterlogging in residential areas and engineering facilities. Effective anti-icing measures require careful planning to identify the icing source and determine optimal locations for dewatering or interception wells. This can be achieved using electrical resistivity tomography to construct a volumetric geoelectric model of the site. We conducted a study in the Mountain Altai region, where hydrogeogenic icing develops, to create a 3D geoelectric model of the icing water discharge zone. Our results yielded a detailed 3D resistivity distribution model, revealing anomalies linked to permafrost and filtration channels. Additionally, by analyzing normalized chargeability anomalies, we more precisely traced the pathway of the icing water feeding channel. We hypothesize that the pronounced anomalies observed in the normalized chargeability distribution arise from its quadratic dependence on electrical tortuosity. This tortuosity decreases as flowing water displaces fine particles from cracks and pores, altering the subsurface properties.

Keywords: hydrogeogenic icing, groundwater discharge, electrical resistivity tomography, normalized chargeability

Введение

В условиях многолетней мерзлоты гидрогеогенные наледи образуются в местах выхода трещинно-жильных вод из подземных напорно-фильтрационных таликов, которые могут располагаться как в руслах рек, так и на поверхности земли. Наледообразование является опасным инженерно-геологическим процессом, который негативно влияет на автомобильные и железные дороги [1, 2] и вызывает подтопление жилых зданий [3, 4].

При инженерном освоении ландшафтов одним из путей обеспечения безопасности является полное устранение наледной опасности. Это достигается за счёт ликвидации источников, способствующих образованию наледи [5]. Однако для того, чтобы ликвидировать источник, необходимо сначала выявить его положение и спланировать места для бурения водозаборных скважин, как это предусмотрено в [6].

Для локализации положения источника наледи необходимо использовать геофизические методы, которые широко применяются при изучении строения участков образования наледей [7, 8, 9]. Одним из наиболее эффективных методов, позволяющих оценить строение геологической среды в объёме, является электротомография. С её помощью возможна локализация каналов фильтрации подземных вод, которые выделяются трубообразными аномалиями пониженного сопротивления [10, 11].

Целью этой работы было построение объёмной геоэлектрической модели участка разгрузки наледных вод в Чуйской впадине Горного Алтая для локализации канала фильтрации подземных вод.

Методы и материалы

Участок исследований находится у подножья горы Мишельдык, высота которой составляет 1831 метр. Ближайший населенный пункт — посёлок Тобелер — расположен в трёх километрах к северо-востоку от него. Гора Мишлельдык представляет собой выход девонских рассланцованных песчаников и алевролитов, к которым с северной стороны примыкает толща четвертичных флювиогляциальных отложений Чуйской впадины. У подножья горы наблюдается множество рассредоточенных и восходящих источников [12]. Зимой из этих источников формируется наледь с наледными буграми, которая достигает автодороги «Чуйский тракт» и осложняет движение автотранспорта.

Район работ относится к зоне развития многолетнемерзлых пород (ММП) островного типа. По результатам бурения 70-х годов мощность многолетнемерзлой толщи в 3,5 км от участка исследований достигала 56 м.

Исследования проводились с использованием метода электротомографии с измерением вызванной поляризации (ЭТ-ВП) на двух площадках с помощью аппаратуры «Скала-64к15». На первой площадке было разбито пять профилей длиной по 155 метров, которые располагались на расстоянии 5 метров друг от друга вкрест простирания наледного бугра. На второй площадке профили были направлены вкрест простирания контакта палеозойских и четвертичных пород. Здесь сеть наблюдений включала также пять профилей длиной по 315 метров, которые находились на расстоянии 20 метров друг от друга. Шаг измерений вдоль про-

филей составил 5 метров. Последовательность подключения электродов соответствовала трёхэлектродной прямой и встречной установкам.

Объемная геоэлектрическая модель была получена с помощью программы Res3Dinvx64. Трёхмерная инверсия выполнена для полного набора данных с двух площадок в глобальных координатах сети измерений. После девяти итераций ошибка подбора модели удельного электрического сопротивления (УЭС) составила 3,24 %, модели поляризуемости – 1,69 %. В результате инверсии строились трёхмерные модели распределения УЭС, заряжаемости (m) и нормированной заряжаемости (m_n).

Заряжаемость рассчитывалась как площадь под кривой спада кривой поляризуемости $\eta(t)$:

$$m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \eta(t) dt, \quad (1)$$

где t_1 и t_2 – время начала и конца измерений кривой спада поляризуемости, мс.

Нормированная заряжаемость m_n равна:

$$m_n = \frac{m}{\rho}, \quad (2)$$

где ρ – УЭС пород, полученное в результате инверсии, Ом·м или См⁻¹/м⁻¹;
 m – заряжаемость, мВ/В.

В ионопроводящих средах показатель m_n имеет связь с поверхностной проводимостью в двойном электрическом слое [13, 14]. Аномалии нормированной заряжаемости наблюдаются в местах, где происходит фильтрация подземных вод в местах утечек через плотины или геомембрану [15, 16, 17].

Результаты

По результатам трёхмерной инверсии была построена объемная геоэлектрическая модель распределения УЭС до глубины 100 м (рис. 1). Высокие сопротивления (более 500 Ом·м) в модели соответствуют ММП, а пониженные и низкие сопротивления отмечаются в таликах и каналах восходящей фильтрации подземных вод в гидрогеогенном талике.

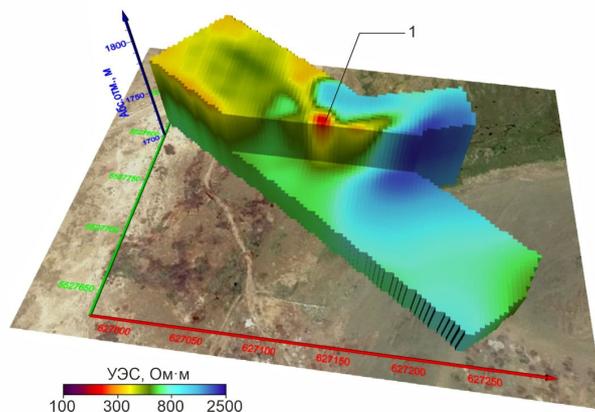


Рис. 1. Объёмная модель распределения УЭС: 1 – аномалия низкого УЭС в канале фильтрации подземных вод по гидрогеогенному талику.

Неожиданно информативной оказалась объемная модель нормированной заряжаемости (рис. 2). Максимальные значения этого параметра отмечаются в каналах восходящей фильтрации. Всего выделено три канала – центральный (основной) и два боковых. Над центральным каналом в зимнее время растёт сезонный бугор пучения (гидролакколит), на котором формируется наледный бугор и разгружаются наледные воды.

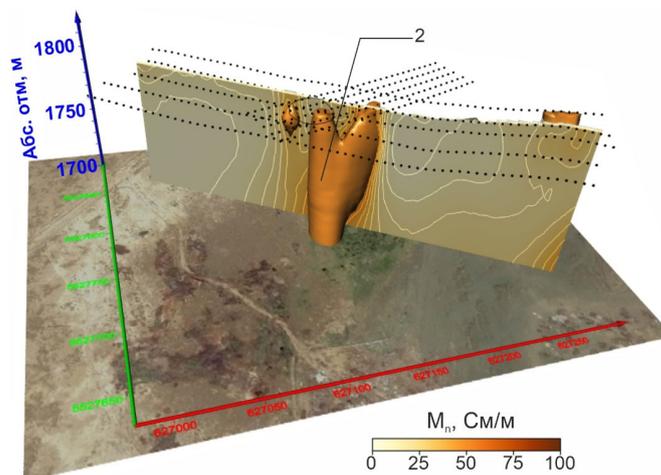


Рис. 2. Объемная модель распределения нормированной заряжаемости (m_n). Изоповерхность 50 См/м: 2 – аномалия m_n в восходящих каналах фильтрации.

Обсуждение

В литературе, посвящённой изучению наледей с помощью геофизических методов, почти не уделяется внимание определению путей фильтрации подземных вод, которые питают наледь. Основное внимание сосредоточено на разделении мёрзлых и талых пород (таликов) в разрезе, а пути движения подземных вод изображаются на моделях разрезов интуитивно [8; 18; 19].

Однако современные технологии позволяют получать объёмное распределение электрических параметров геологической среды, что даёт возможность судить о её внутреннем строении.

Мы установили, что восходящий канал фильтрации подземных вод проявляется чёткой трубообразной аномалией нормированной заряжаемости m_n (рис. 2) которая разветвляется к поверхности, и разгрузка подземных вод происходит в нескольких местах, образуя групповой источник. И если в объёмной модели распределения УЭС низкими значениями сопротивления выделяются и обводнённые четвертичные отложения, и обводнённые трещиноватые палеозойские породы, то аномалия m_n оконтуривает только области фильтрации воды.

Обычно аномалии поляризуемости и нормированной заряжаемости в местах фильтрации грунтовых вод связывают с повышенным содержанием глины, органики и металлов в заполнителе порового пространства [16, 20, 21]. В тех случаях, когда содержание глины в порах мало, повышенная нормированная заряжаемость горных пород объясняется увеличением солёности поровой влаги [22]. Од-

нако мы считаем, что в канале фильтрации не может быть высокой глинистости вследствие выноса мелких частиц потоком воды. Минерализация воды здесь также относительно невысокая, а минералы с электронной проводимостью отсутствуют вовсе.

Мы считаем, что возникновение аномалий нормированной заряжаемости в области фильтрации подземных вод связано с тем, что при выносе мелких частиц уменьшается гидродинамическая извилистость пор, которая в первом приближении равна электрической извилистости пор (τ_{el}). Согласно [23], УЭС породы ρ_r пропорционально квадрату электрической извилистости пор. При нормировании заряжаемости (m) на УЭС получается, что нормированная заряжаемость обратно пропорциональна квадрату электрической извилистости пор:

$$m_n = \frac{m}{\rho_r} = \frac{m \cdot \phi}{\tau_{el}^2 \cdot \rho_f}, \quad (3)$$

где m – заряжаемость, мВ/В;

ϕ – коэффициент пористости, безразмерный;

ρ_r – удельное электрическое сопротивление породы, Ом·м;

ρ_f – удельное электрическое сопротивление поровой воды, Ом·м;

τ_{el} – электрическая извилистость, равная отношению длины капилляра к кратчайшему расстоянию между соответствующими гранями куба породы.

По всей видимости, параметр m_n является хорошим инструментом для выявления каналов фильтрации подземных вод и может быть использован для решения широкого круга задач, в том числе и для локализации источников наледных вод гидрогеогенных наледей.

Заключение

Наледи оказывают негативное влияние на мосты и насыпи автомобильных дорог, вызывают подтопление территории жилых зданий и инженерных сооружений. Для борьбы с наледями необходимо установить положение их источника для того, чтобы спланировать местоположение устьев водопонижающих или перехватывающих скважин.

Технология электротомографии даёт возможность получать объёмные геоэлектрические модели распределения УЭС, интерпретация которых позволяет оконтурить мёрзлые и талые породы и определить положение гидрогеогенного талика, по которому происходит фильтрация подземных вод к зоне разгрузки.

Однако еще более информативной оказалась модель распределения нормированной заряжаемости, в которой практически на нулевом фоне чётко выделяется трубообразная интенсивная аномалия m_n , указывающая на положение канала восходящей фильтрации подземных вод.

Мы объясняем природу интенсивных аномалий нормированной заряжаемости её обратной квадратичной зависимостью от электрической извилистости пор, которая в свою очередь уменьшается из-за выноса мелких частиц потоком воды из трещин и пор в горных породах.

Мы продолжим исследования на подобных объектах для создания представительной выборки данных для статистического анализа.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) № FWZZ-2022-0024 «Геоэлектрические и электромагнитные методы исследования верхней части земной коры: теория, модели, эксперимент».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шестернев Д. М., Верхотуров А. Г. Воздействие наледей на инженерные сооружения // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2016. – Т. 22. – № 10. – С. 30-40.
2. Баишев Н. Е., Шепёлев В. В., Гагарин Л. А. О закономерностях распространения наледей на федеральной автодороге А-360" Лена" по данным мультиспектральных космических снимков // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 60-69.
3. Верхотуров А. Г. Многолетняя динамика наледей центрального и Южного Забайкалья // Подземная гидросфера: материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с международным участием), г. Екатеринбург, 21-28 июня 2024 г. / Институт горного дела УрО РАН [отв. ред.: док. геол.-минер. наук С. В. Алексеев, док. геол.-минер. наук Л. С. Рыбникова], Екатеринбург: Институт горного дела ИГД УрО РАН, 2024. – 556 с.
4. Черных В. Н. Распространение и динамика наледей в Селенгинском среднегорье // Известия Русского географического общества. – 2025. – Т. 156. – № 2. – С. 155-168.
5. Алексеев В. Р. Проблемы инженерного освоения наледных участков речных долин // Криосфера земли. – 2017. – Т. 21. – № 6. – С. 65-75.
6. Свод правил. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003.
7. Оленченко В. В., Макарьева О. М., Землянскова А. А., Данилов К. П., Осташов А. А., Калганов А. С., Нестерова Н. В., Христофоров И. И. Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) // Геодинамика и тектонофизика. – 2023. – Т. 14. – № 3. – С. 0702.
8. Liu W., Fortier R., Molson J., Lemieux J. M. A conceptual model for talik dynamics and icing formation in a river floodplain in the continuous permafrost zone at Salluit, Nunavik (Quebec), Canada // Permafrost and Periglacial Processes. – 2021. – V. 32. – № 3. – P. 468-483.
9. Terry N. et al. Seasonal subsurface thaw dynamics of an aufeis feature inferred from geophysical methods // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2020. – V. 125. – № 3. – P. e2019JF005345.
10. Оленченко В. В., Гагарин Л. А., Христофоров И. И., Колесников А. Б., Ефремов В. С. Строение участка развития термосуффозионных процессов в пределах Бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21. – № 5. – С. 16-26.
11. Оленченко В. В., Макарьева О. М., Землянскова А. А., Осташов А. А., Калганов А. С., Чекрыжов А. В. Геокриологические условия формирования гигантской наледи подземных вод р. Анмангында (Магаданская область) по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2024. – 15(2):0753.
12. 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.

13. Lesmes D. P., Frye K. M. Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2001. – V. 106. – № B3. – P. 4079-4090.
14. Slater L. D., Lesmes D. IP interpretation in environmental investigations // *Geophysics*. – 2002. – Т. 67. – № 1. – P. 77-88.
15. Калганов А. С., Оленченко В. В., Осипова П. С. Оценка влагонасыщенности рудной массы и поиск нарушений гидроизоляции при кучном выщелачивании золота // *Инженерная и рудная геофизика 2022: Сборник материалов 18-й научно-практической конференции и выставки (г. Геленджик, Россия, 5-8 сентября 2022 г.)*. – М.: ООО «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2022. – С. 293-301.
16. Abdulsamad F., Revil A., Ahmed A. S., Coperey A., Karaoulis M., Nicaise S., Peyras L. Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in embankments // *Engineering Geology*. – 2019. – V. 254. – P. 89-101.
17. Ustra, A. T., Elis, V. R., Mondelli, G., Zuquette, L. V., Giacheti, H. L. Case study: a 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil // *Environmental Earth Sciences*. – 2012. – V. 66. – P. 763-772.
18. You Y., Yang M., Yu Q., Wang X., Li X., Yue Y. Investigation of an icing near a tower foundation along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line // *Cold Regions Science and Technology*. – 2016. – V. 121. – P. 250-257.
19. Walther M., Batsaikhan V., Dashtseren A., Jambaljav Y., Temujin Kh., Ulanbayar G., Kamp U. Development of perennial thaw zones in boreal hillslopes enhances potential mobilization of permafrost carbon // *Environmental Research Letters*. – 2019. – V. 14. – № 1. – P. 015003.
20. Viezzoli A., Cull J. P., Massie D. Mapping fly-ash water pond leakage with TEM and IP data at Loy Yang coal-mine (Australia) // *Near Surface Geophysics*. – 2006. – V. 4. – № 5. – P. 305-311.
21. Fedorova O. I., Gorshkov V. Y. Geoelectric Geoelectric Monitoring of Earthen Hydraulic Structure State by Resistivity and Induced Polarization Methods: Mine Water Settling Pond Dam Case Study // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2023. – V. 23. – № 4. – P. 4011.
22. Elis V. R. et al. Application of induced polarization and resistivity to the environmental investigation of an old waste disposal area // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – Т. 75. – С. 1-13.
23. Дахнов В. Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 310 с.

© В. В. Оленченко, А. А. Заплавнова, 2025