

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.837

DOI: 10.15372/KZ20250505

EDN: CJGIRM

СТРОЕНИЕ ИСТОЧНИКА ГИДРОГЕОГЕННОЙ НАЛЕДИ
В ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЕ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ) ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В.В. Оленченко *, А.А. Заплавнова, М.В. Медведева

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, лаборатория геоэлектрики,
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия**Автор для контакта; e-mail: olenchenkovv@ipgg.sbras.ru*

Наледеобразование является опасным инженерно-геологическим процессом, оказывающим негативное влияние на инженерные объекты. Для прогнозирования развития наледей или разработки эффективных противоналедных мероприятий необходимо определять местонахождение источника питания наледи и планировать места расположения водозаборных скважин. Эти задачи помогают решить геофизические методы. Целью работы было изучение строения участка разгрузки подземных вод, питающих гидрогеогенную наледь, для планирования противоналедных мероприятий. Исследования проведены методами георадиолокации георадаром ОКО-3 с антенной 250 МГц, бесконтактного измерения электрического поля с аппаратурой ВЕГА на частоте 16.5 кГц и методом электротомографии с измерением вызванной поляризации с аппаратурой Скала 64к15. По данным георадиолокации установлено, что глубина сезонного промерзания в пределах наледного бугра достигает 1.8–2.7 м. Выявлены признаки разгрузки подземных вод в виде локальных аномалий с уменьшением глубины сезонного промерзания до 1.3 м. Установлено, что наледный бугор располагается на сезонном бугре пучения с ледяным ядром, а в основании бугра в коренных породах выделены признаки разломной зоны. Зондирования методом электротомографии и построение объемных моделей распределения удельного электрического сопротивления и нормированной заряжаемости на глубину до 100 м позволили выявить и очертить ветвящиеся вертикальные каналы восходящей фильтрации подземных вод, питающих наледь групповым источником.

Ключевые слова: наледь, многолетнемерзлые породы, фильтрация подземных вод, георадиолокационное зондирование, электротомография, нормированная заряжаемость.

Ссылка для цитирования: Оленченко В.В., Заплавнова А.А., Медведева М.В. Строение источника гидрогеогенной наледи в Чуйской впадине (Горный Алтай) по геофизическим данным // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 5, с. 45–57. DOI: 10.15372/KZ20250505. EDN: CJGIRM.

GEOPHYSICAL MODEL OF THE HYDROGEOGENIC ICING SOURCE IN THE CHUYA BASIN (GORNYY ALTAI)

V.V. Olenchenko *, A.A. Zaplavnova, M.V. Medvedeva

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Laboratory of Geoelectrics, Akademika Koptuga Ave. 3, Novosibirsk, 630090 Russia***Corresponding author; e-mail: olenchenkovv@ipgg.sbras.ru*

Icing formation represents a hazardous engineering-geological process that adversely affects infrastructure facilities. To predict icing development and suggest adequate control measures, it is necessary to identify the location of the icing water source and plan the placement of water intake wells. Geophysical methods help solve these tasks. The objective of this study was to investigate the structure of the groundwater discharge zone feeding a hydrogeogenic icing to plan anti-icing measures. The investigations employed ground-penetrating radar (GPR) equipped with an OKO-3 system and a 250 MHz antenna, capacitive-coupled resistivity measurements using VEGA instrument at 16.5 kHz frequency, and electrical resistivity tomography with induced polarization measurements using Skala-64k15 system. GPR data revealed that the seasonal freezing depth within the icing mound reaches 1.8–2.7 m. Signs of groundwater discharge were identified as local anomalies with reduced seasonal freezing depth down to 1.3 m. The study established that the icing mound forms over a seasonal frost heave mound containing an ice core, while the bedrock base shows evidence of a fault zone. Electrical resistivity tomography surveys and 3D modeling of resistivity and normalized chargeability distributions to a depth of 100 m enabled the identification and delineation of branching vertical channels of ascending groundwater filtration. These channels form a group source feeding the icing.

Keywords: icing, permafrost, groundwater filtration, ground penetrating radar, electrical resistivity tomography, normalized chargeability.

ВВЕДЕНИЕ

Наледи – это распространенное явление в криолитозоне. В России они особенно распространены на северо-востоке, где их размеры могут достигать нескольких километров, а иногда и десятков километров [Алексеев и др., 2021]. Наледи также встречаются в Южной Якутии, Забайкалье, Бурятии, Горном Алтае.

Наледообразование – опасный процесс, вызывающий автомобильные и железные дороги и вызывающий подтопление зданий [Шестернёв, Верхотуров, 2016; Баишев и др., 2021; Верхотуров, 2024; Черных, 2025]. В исследованиях, в частности по северо-западу Канады, представлены подходы к предотвращению наледей, эффективность которых зависит от источника воды, типа инфраструктуры и ее роли в формировании наледи [Turcotte et al., 2023].

С развитием геофизической аппаратуры и программного обеспечения для обработки данных количество и качество информации, получаемой при изучении строения наледей и наледных полей, постоянно возрастает. В мировой практике активно применяются методы георадиолокации, электротомографии, тепловизионной съемки [Оленченко и др., 2023, 2024; Arcone et al., 1998; Walvoord et al., 2019; O'Neill et al., 2020; Terry et al., 2020; Liu et al., 2021; Walther et al., 2021], электромагнитные зондирования [Потанов, 2022; O'Neill et al., 2020] и, в редких случаях, ядерно-магнитный резонанс [Terry et al., 2020]. Основные задачи, решаемые с помощью геофизических методов, включают определение толщины льда, глубины сезонного промерзания, оконтуривание подрусловых таликов и выявление участков разгрузки подземных наледообразующих вод.

В Горном Алтае в 2000–2010 гг. было установлено, что более 75 % наледей формируются на высотах 800–2000 м и имеют цикл активизации каждые 2–4 года [Достовалова, Шитов, 2011]. Наледи оказывают значительное негативное воздействие на инфраструктуру, а существующие методы борьбы (например, валы) часто неэффективны.

Ранее геофизические исследования наледей в этом регионе не проводились. Такие данные важны для прогнозирования развития наледей и планирования защитных мероприятий, включая поиск источников питания и мест для водозаборных скважин [Свод правил, 2012].

Цель настоящей работы – изучить строение участка разгрузки подземных вод, питающих наледь, для планирования эффективных мер борьбы. Задачи исследования включают определение толщины наледи, глубины промерзания, границ мерзлых пород и каналов фильтрации подземных вод.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА

Участок исследований расположен в Чуйской впадине (Кош-Агачский район, Республика Алтай) вблизи трассы Р-256 и пос. Тобелер (рис. 1).

Геологически район сложен палеозойскими породами (сланцы, алевролиты, песчаники ташантинской свиты) и четвертичными флювиогляциальными отложениями [Зольников и др., 2010; Деев и др., 2012]. Территория относится к зоне островного распространения многолетнемерзлых пород (мощность до 56 м) [Мерзлотно-гидрогеологическая карта..., 1977; Шац, 1978].

Исследования проводились у подножия горы Мишельдык, где находится наледное поле в зоне солончаков [Шитов, 2018]. Здесь наблюдается разгрузка многочисленных источников [Достовалова, Шитов, 2011], зимой формирующих наледь с буграми пучения.

Изучаемый наледный бугор (размеры 45 × 30 м, высота 2 м) представлял собой сезонный гидролакколит с ледяным ядром (рис. 2). Толщина льда на вершине составляла 0.45 м. Разгружающиеся воды имели минерализацию 287 ppm, pH 9.4 и удельное электрическое сопротивление 16.7 Ом·м. В 30–50 м от бугра обнаружены воды с более высокой минерализацией (удельное сопротивление 5.5 Ом·м).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в два этапа: в марте (максимальное развитие наледи) и в июле (полное оттаивание).

На первом этапе применялись методы, не требующие заземления: георадиолокация (ГРЛ) на частотах 250 и 400 МГц по сети профилей (рис. 3, б) для определения толщины льда и бесконтактное измерение электрического поля (БИЭП) на частоте 16.5 кГц с использованием аппаратуры “ВЕГА” и дипольно-осевой установки.

На втором этапе использовался метод электротомографии с измерением вызванной поляризации (ЭТ–ВП) на двух площадках: поперек контура растаявшего наледного бугра и поперек геологического контакта пород (см. рис. 3, а).

Обработка данных ЭТ–ВП выполнялась в программах Res2Dinv и Res3Dinv, что позволило построить 2D-разрезы и 3D-модели распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) и поляризуемости.

Дополнительно был рассчитан параметр нормированной заряжаемости (m_n), который является индикатором зон фильтрации подземных вод [Калганов и др., 2022; Ustra et al., 2012; Abdulsamad et al., 2019] и связан с поверхностной проводимостью [Lesmes, Frye, 2001; Slater, Lesmes, 2002].

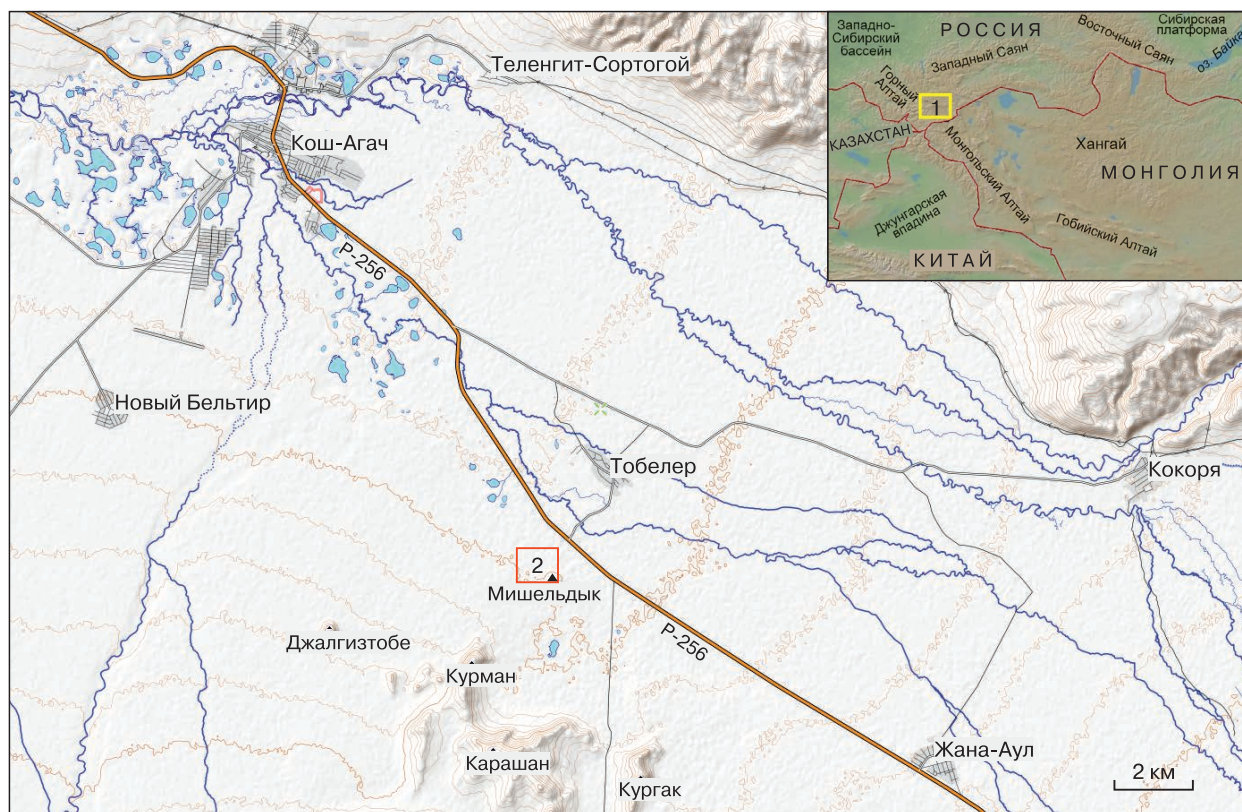


Рис. 1. Схема расположения района (1) и участка (2) исследований.



Рис. 2. Зондирования методом бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП) на наледном бугре.

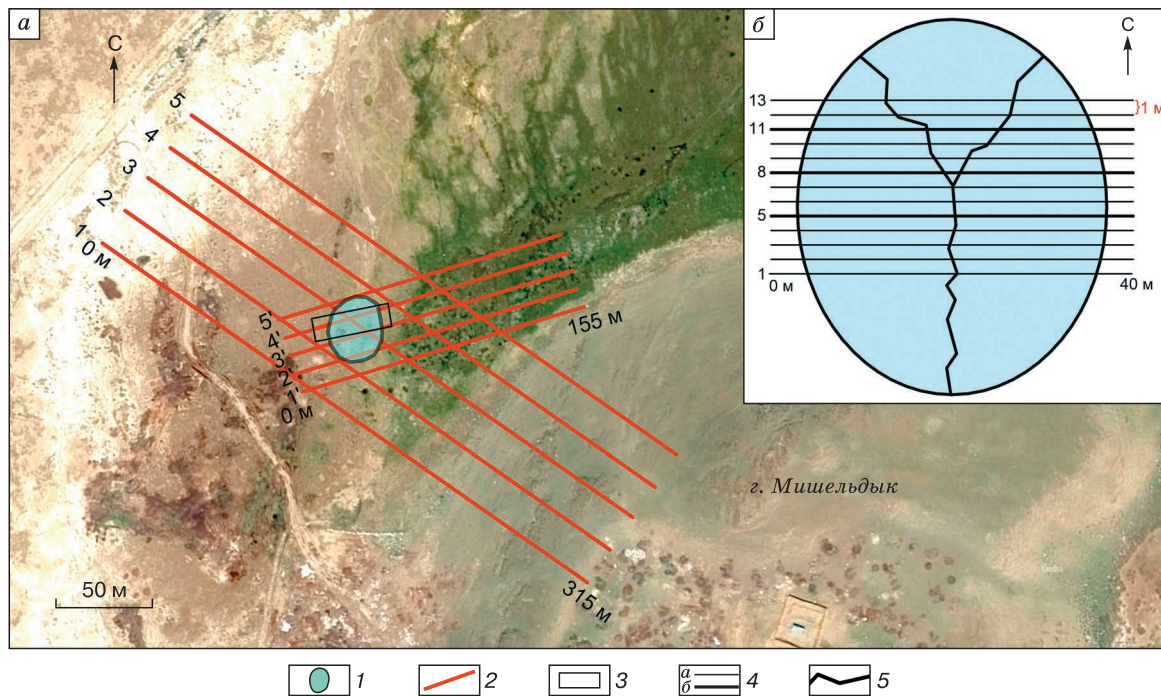


Рис. 3. Схема расположения профилей электротомографии с измерением вызванной поляризации (а), георадиолокации и бесконтактного измерения электрического поля (б).

1 – наледный бугор; 2 – профили электротомографии и их номера; 3 – площадь георадиолокации и БИЭП; 4 – профили ГРЛ (а) и БИЭП (б); 5 – трещины в наледном бугре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На радарограмме профиля № 8 (рис. 4, а) четко идентифицируются граница сезонномерзлого слоя (I), предполагаемая кровля коренных пород (II), зона трещины с разгрузкой вод, отмеченная гиперболами дифракции (III). Антенна 400 МГц позволила зафиксировать увеличение толщины льда от 0.05 м на периферии бугра до 0.45 м в его центре.

Послойная интерпретация с заданными диэлектрическими проницаемостями пород (см. рис. 4, б) показала, что глубина сезонного промерзания варьирует от 1.8 до 2.7 м, а кровля коренных пород залегает субгоризонтально, без погружения под бугром. При интерпретации было принято, что диэлектрическая проницаемость (ДП) сезонномерзлых пород равна 4, талых влажных суглинков – 17, обводненного щебня – 30, песчаников и алевролитов – 6 [Владов, Судакова, 2017].

По результатам 2D-инверсии данных БИЭП сезонномерзлый слой и лед характеризуются высокими значениями УЭС (3000–15 000 Ом·м) (см. рис. 4, в). При этом сопротивление сезонномерзлого слоя заметно понижается на краях наледного бугра, что, вероятно, связано с засоленностью пород [Шитов, 2018]. В зоне разгрузки подземные воды имеют относительно низкую минерализацию

и УЭС около 16 Ом·м, что в три раза выше, чем у вод местных солончаков. Слой талых рыхлых отложений обладает УЭС 100–300 Ом·м. Ниже залегают высокоомные породы (3000–15 000 Ом·м), интерпретируемые как коренной коколь. Под куполом бугра выявлена вертикальная аномалия пониженного УЭС (до 1000 Ом·м) – предполагаемая зона разлома, служащая путем разгрузки подземных вод. Стоит отметить, что по данным БИЭП кровля коренных пород залегает глубже, чем по данным ГРЛ. Это расхождение может быть вызвано неучетом латеральных изменений диэлектрической проницаемости, эквивалентностью резистивной модели или влиянием электрической анизотропии в слое рыхлых пород [Кожевников, Никифоров, 1997].

На карте глубины сезонного промерзания пород, полученной по данным площадных измерений ГРЛ (рис. 5), выделяются локальные участки уменьшения глубины сезонного промерзания с 2.8 до 1.3 м. Скорее всего, эти участки отмечают положение каналов разгрузки подземных вод в бугре пучения. Хорошо видно, что разгрузка подземных вод происходила по нескольким каналам (см. рис. 5) и представляет собой так называемый групповой выход подземных вод [Геологический словарь, 1978].

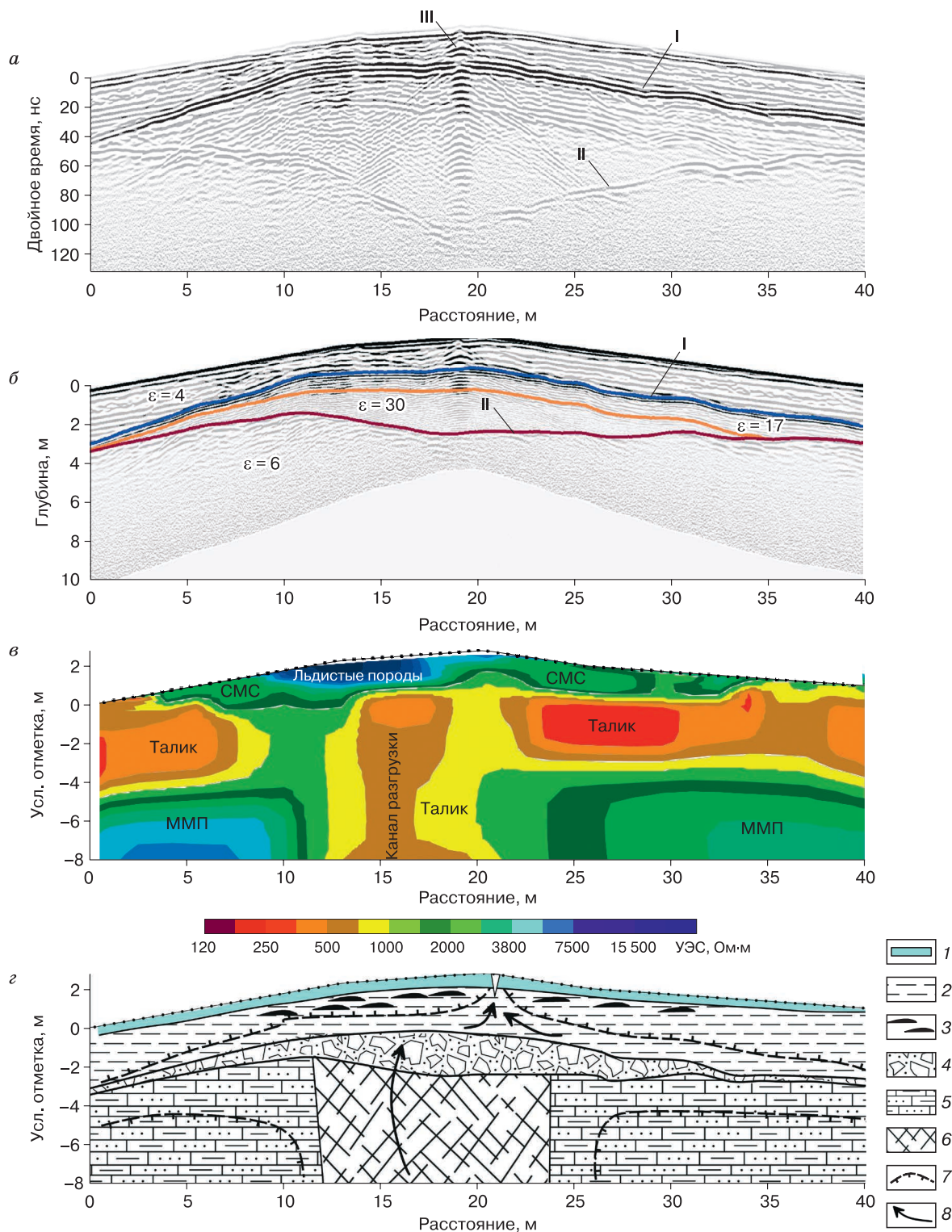


Рис. 4. Результаты георадиолокации и бесконтактного измерения электрического поля по профилю № 8.

a – исходная радарограмма; *б* – послойная интерпретация; *в* – геоэлектрический разрез по данным БИЭП; *г* – интерпретационный разрез по профилю; I – отражающая граница от подошвы сезонномерзлого слоя; II – отражающая граница от кровли коренных пород; III – гипербола дифракции на трещине; 1 – лед; 2 – рыхлые породы; 3 – высокая льдистость; 4 – элювий коренных пород (щебень); 5 – коренные породы; 6 – зона повышенной трещиноватости; 7 – граница мерзлых пород; 8 – предполагаемое направление фильтрации подземных вод.

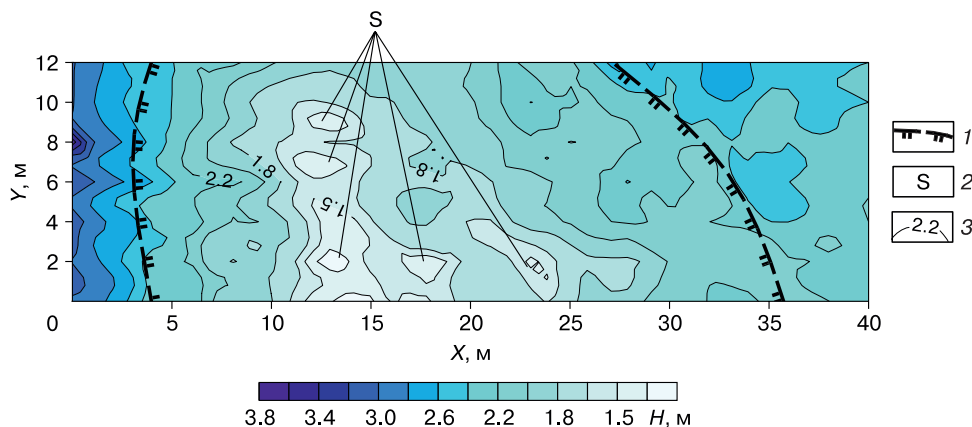


Рис. 5. Карта глубины (H) сезонного промерзания пород в пределах наледи.

1 – граница бугра пучения; 2 – предполагаемое положение источников разгрузки наледных вод в бугре пучения; 3 – изолиния глубины сезонного промерзания пород.

В июле, на момент проведения работ методом электротомографии, наледный бугор полностью растаял, а на его месте образовалось термокарстовое понижение, заполненное водой.

На разрезе УЭС по профилю № 3 отмечается погружение границы геоэлектрических комплексов коренных пород с разным удельным электрическим сопротивлением (рис. 6). При этом однозначно интерпретировать границу между рыхлыми четвертичными отложениями и палеозойским основанием не представляется возможным по следующим причинам. Во-первых, из-за близких значений УЭС мерзлых глинистых четвертичных отложений и талых коренных пород. Во-вторых, из-за неравномерного УЭС подземных вод – низкое у вод солончаков (5.5 Ом·м) и повышенное (16.7 Ом·м) у глубинных вод. В-третьих, из-за на-

личия элювия в кровле коренных пород, УЭС которого определяется степенью разрушенности, влажностью, температурой и минерализацией поровой воды и может быть близко по значениям сопротивлений к четвертичным отложениям. На близкое к поверхности залегание элювия коренных пород в интервале пикетов 140–220 м указывают такие криогенные формы микрорельефа, как многочисленные следы морозной сортировки в виде каменных пятен, состоящих из крупного щебня (150–300 мм) и валунов.

УЭС пород на разрезе по профилю № 3 изменяется от первых десятков ом-метров в приповерхностной обводненной и засоленной части разреза до 6000–13 000 Ом·м у сильнольдистых пород на участке образования гидролакколита и наледного бугра. Выделить четкие границы мерз-

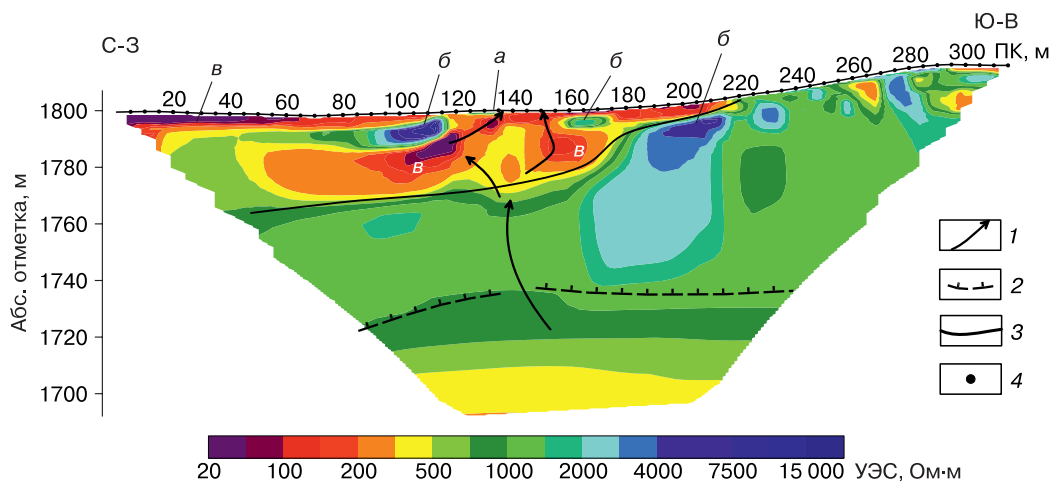


Рис. 6. Геоэлектрический разрез по профилю № 3 по результатам 2D-инверсии.

а – место образования бугра пучения; б – сильнольдистые породы; в – обводненные породы; 1 – предполагаемое направление движения подземных вод; 2 – подошва многолетнемерзлых пород с учетом априорной информации; 3 – предполагаемая подошва талика; 4 – расположение электродов.

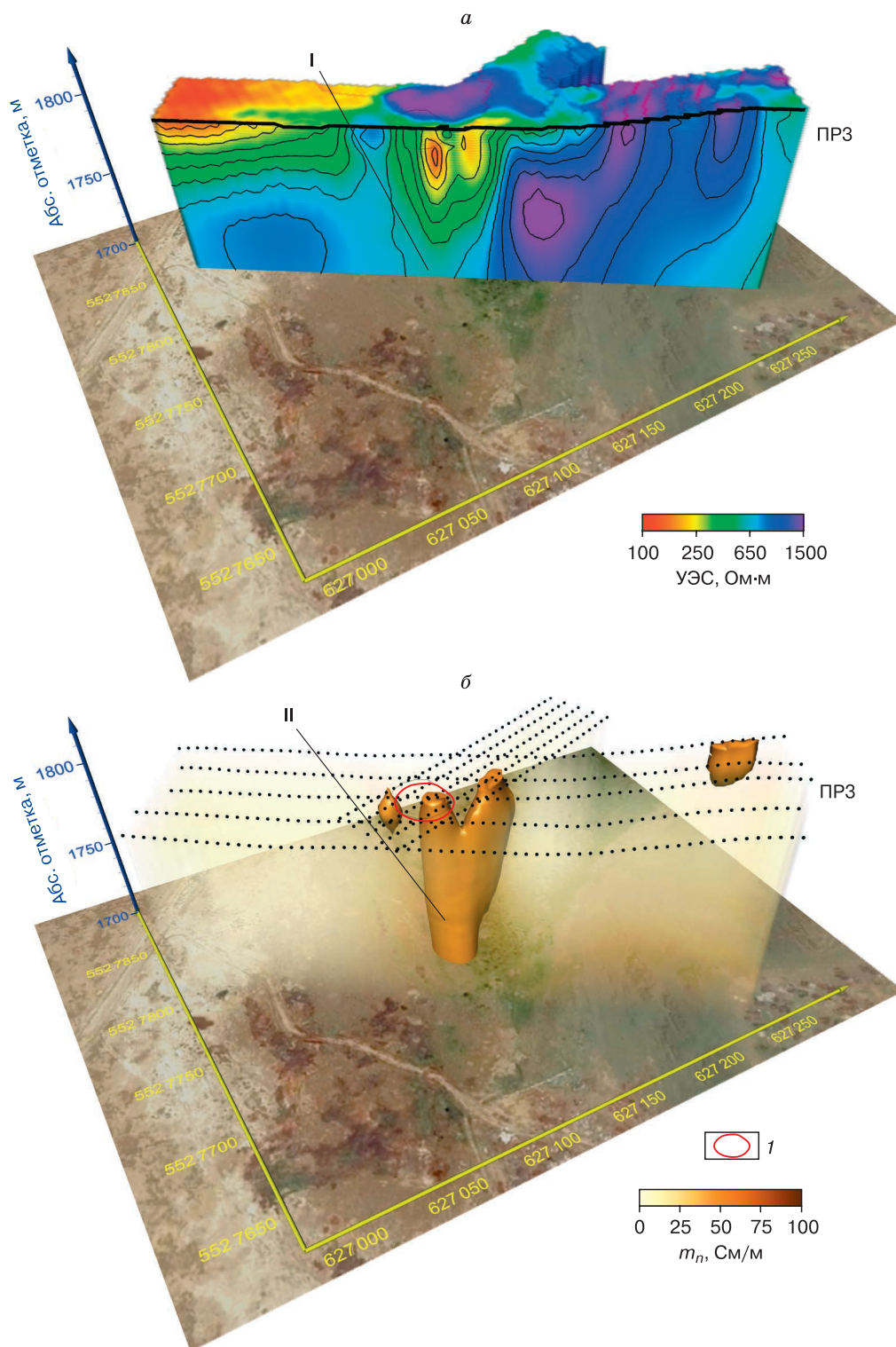


Рис. 7. Объемное распределение удельного электрического сопротивления (*а*) и заряжаемости m_n (*б*) на участке исследований по результатам 3D-инверсии.

1 – участок образования бугра пучения; I – аномалия пониженного УЭС от вертикального канала фильтрации подземных вод, питающих наледь; II – аномалия нормированной заряжаемости, изоповерхность 50 См/см.

лых и талых пород в верхней части разреза затруднительно из-за их неравномерной засоленности и разного литологического состава. Можно лишь с уверенностью говорить о том, что области разреза с очень низким сопротивлением соответствуют талым породам, насыщенным минерализованными поровыми растворами, а локальные высокоомные аномалии связаны с сильнольдистыми породами.

Предполагаемые коренные породы до глубины 65–70 м имеют УЭС около 1000 Ом·м с локальными аномалиями до 2500–5000 Ом·м. На глубине более 70 м их сопротивление уменьшается до 400 Ом·м. Согласно априорной информации, подошва ММП в этом районе залегает на глубине около 65 м [Мерзлотно-гидрогеологическая карта..., 1977]. Таким образом, градиентная граница между высокоомными и относительно низкоомными породами на глубине 65–70 м интерпретируется как подошва ММП.

На разрезах УЭС по результатам 2D-инверсии не очевидно наличие вертикального канала фильтрации подземных вод из глубины к месту разгрузки. Это связано с тем, что канал фильтрации – трехмерная структура и ее выделение возможно только по результатам трехмерной инверсии.

На трехмерной геоэлектрической модели (рис. 7, а), построенной по результатам 3D-инверсии, под местом образования гидролакколита и наледного бугра выделяется вертикальная область пониженных значений УЭС 50–300 Ом·м на фоне пород с сопротивлением 500–1500 Ом·м. Мы считаем, что эта аномалия вызвана вертикальным

каналом фильтрации подземных вод к области разгрузки на поверхности. Подобные трубообразные аномалии низкого УЭС, связанные с каналами фильтрации подземных вод, были выделены ранее на участках формирования термосуффозионных воронок [Оленченко и др., 2017] и наледных бугров [Оленченко и др., 2024].

Объемная модель распределения нормированной заряжаемости m_n (см. рис. 7, б) нагляднее демонстрирует структуру вертикального канала фильтрации. По изоповерхности 50 См/м оконтуриваются основной вертикальный канал, над которым зимой формируется гидролакколит и наледный бугор, а также второстепенный канал, расположенный ближе к подножию горы Мишельдык. В летний период разгрузка подземных вод из второстепенного канала происходит в виде источников (ключей), над которыми зимой формируется наледь.

На карте распределения УЭС по глубине 20 м, представляющей собой горизонтальный срез 3D-модели (рис. 8, а), аномалиями низкого сопротивления хорошо проявлена группа каналов восходящей фильтрации подземных вод. При этом вариации высокого сопротивления, по-видимому, отражают изменение литологического состава и температуры мерзлых пород. Один из каналов (центральный) является основным, а другие – второстепенными. Здесь на поверхности наблюдается групповая разгрузка на макроуровне.

На карте распределения нормированной заряжаемости (см. рис. 8, б) на нулевом фоне выде-

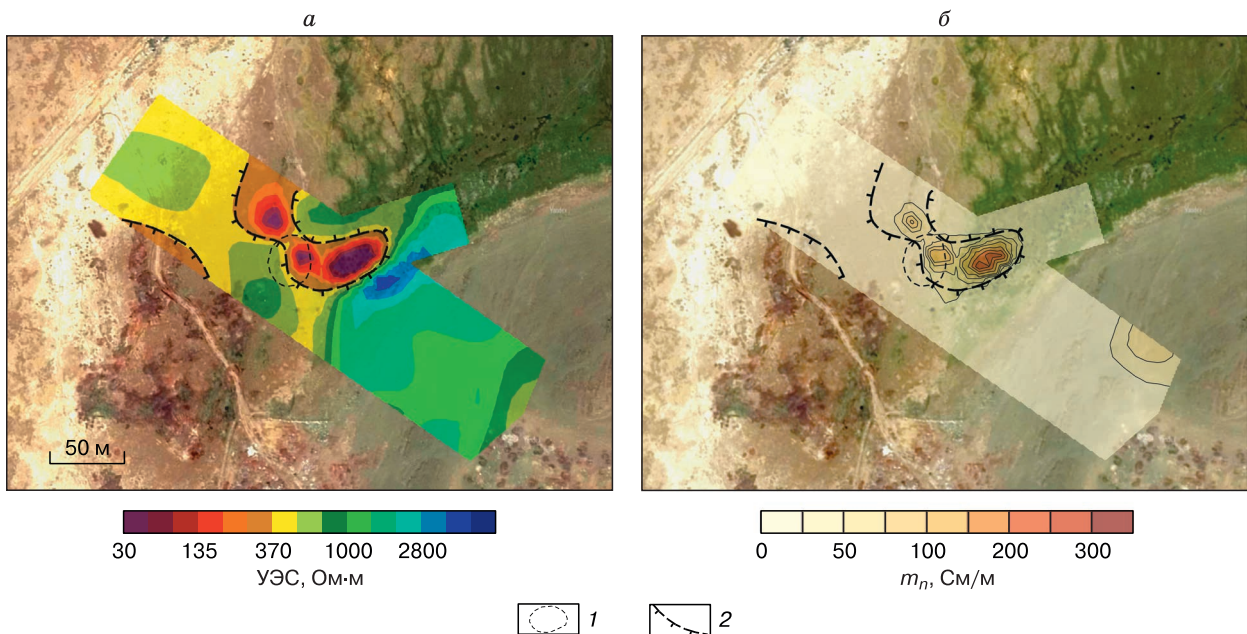


Рис. 8. Карты распределения удельного электрического сопротивления (а) и нормированной заряжаемости m_n (б) на глубине 20 м.

1 – место образования гидролакколита и наледного бугра; 2 – предполагаемые границы многолетнемерзлых пород.

ляются только аномалии от каналов фильтрации подземных вод, что удобно использовать для локализации источников наледных вод.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Участок образования сезонного инъекционного бугра пучения, наледного бугра и наледи у г. Мишельдык представляет собой классическую открытую систему, когда сезонное промерзание пород происходит с подтоком воды [Бойцов, 2011]. Согласно классификации таликов [Романовский, 1983], приток воды происходит из гидрогеогенного субаэрального напорно-фильтрационного сквозного талика. Выводы о генезисе наледи, формирующейся у г. Мишельдык в Чуйской впадине, и предположение о строении источников подземных вод, питающих наледь, можно сделать и на основании геоморфологического анализа, сведений о геокриологическом строении территории. Однако “разглядеть” детали строения каналов фильтрации и разгрузки подземных вод можно только с помощью геофизических методов.

Мы показали, что по данным площадной георадиолокации субгляциальная разгрузка подземных вод на участке образования наледного бугра осуществляется через групповой источник, который проявляется в виде нескольких локальных зон с минимальной глубиной сезонного промерзания. Аналогичные геофизические признаки каналов субгляциальной разгрузки подземных вод наблюдались на наледи р. Анмангында в Магаданской области [Оленченко и др., 2023]. Подобные аномалии на радарограммах установлены на наледи Купарук (Kuparuk) на Аляске [Terry et al., 2020]. Однако эти аномалии были выявлены на отдельных профилях и не оконтурены в плане, поэтому никак не проинтерпретированы.

В современной литературе, посвященной изучению наледей с помощью геофизических методов, практически не уделяется внимание задаче выделения каналов фильтрации подземных вод, питающих наледь. Основной акцент в интерпретации делается на разделение мерзлых и талых пород (таликов) в разрезе, а пути движения подземных вод изображаются на моделях разрезов интуитивно [You et al., 2016; Liu et al., 2021; Walther et al., 2021]. Даже концептуальные модели повышения давления грунтовых вод в подрусловом талике строятся на основе общих представлений о строении этого талика, а не на результатах площадных геофизических исследований [Liu et al., 2021]. Тем не менее современные технологии позволяют получать объемное распределение электрических параметров геологической среды, по которому можно судить о ее внутреннем строении.

По нашим данным, восходящий канал фильтрации подземных вод проявляется на фоне вертикальной аномалии пониженного сопротивления

четкой трубообразной аномалией нормированной заряжаемости m_n (см. рис. 7, б), которая разветвляется к поверхности, и разгрузка подземных вод происходит в нескольких местах, образуя групповой источник на макроуровне. И если в объемной модели распределения УЭС низкими значениями сопротивления выделяются и обводненные четвертичные отложения, и обводненные трещиноватые палеозойские породы, то аномалия m_n оконтуривает только области фильтрации воды. Это различие в распределении полей особенно хорошо видно на горизонтальных срезах объемных моделей УЭС и нормированной заряжаемости (см. рис. 8).

Анализ литературы показывает, что на многих гидротехнических сооружениях и полигонах бытовых отходов, где изучается распределение УЭС и поляризуемости, в областях фильтрации грунтовых вод отмечаются аномалии повышенной поляризуемости или нормированной заряжаемости [Viezzoli et al., 2006; Ustra et al., 2012; Abdulsamad et al., 2019; Fedorova, Gorshkov, 2023]. Некоторые авторы увязывают аномалии поляризуемости и нормированной заряжаемости в местах фильтрации грунтовых вод от свалок или хвостохранилищ с повышенным содержанием глины, органики и металлов в заполнителе порового пространства [Viezzoli et al., 2006; Abdulsamad et al., 2019; Fedorova, Gorshkov, 2023]. В тех случаях, когда содержание глины в порах мало, повышенная нормированная заряжаемость горных пород объясняется увеличением солености поровой воды [Elis, 2016].

Однако мы считаем, что в восходящем канале фильтрации не может быть высокой глинистости вследствие выноса потоком воды мелких частиц из трещин в коренных породах и из пор в рыхлых отложениях. Минерализация воды здесь также относительно невысокая, а минералы с электронной проводимостью полностью отсутствуют.

Другая возможная причина возникновения аномалий нормированной заряжаемости в области канала фильтрации заключается в том, что при выносе мелких частиц уменьшается гидродинамическая извилистость пор. Согласно [Дахнов, 1985], УЭС породы (ρ_r) пропорционально квадрату электрической извилистости пор, которая в первом приближении равна гидродинамической извилистости:

$$\rho_r = \frac{\tau_{el}^2}{\phi} \rho_f,$$

где τ_{el} – электрическая извилистость, равная отношению длины капилляра к кратчайшему расстоянию между соответствующими гранями куба породы; ϕ – коэффициент пористости, безразмерный; ρ_f – удельное электрическое сопротивление поровой воды, Ом·м.

Таким образом, нормированная заряжаемость m_n обратно пропорциональна квадрату электрической извилистости пор и УЭС поровой воды:

$$m_n = \frac{m}{\rho_r} = \frac{m\phi}{\tau_{cl}\rho_f},$$

где m – заряжаемость, мВ/В.

Из этой формулы следует, что при постоянной минерализации подземных вод, слабо меняющейся пористости и поляризуемости существенное влияние на нормированную заряжаемость m_n оказывает электрическая извилистость пор, примерно равная гидродинамической извилистости. Следовательно, параметр m_n является хорошим инструментом для выявления каналов фильтрации подземных вод и может быть использован для решения широкого круга задач, в том числе для локализации источников наледных вод гидрогеогенных наледей.

Одним из активных способов борьбы с гидрогеогенными наледями может быть перехват подземных вод в канале фильтрации с помощью скважины и организация стока через отводные трубы. В этом случае построение трехмерной геоэлектрической модели участка разгрузки наледных вод и оконтуривание канала восходящей фильтрации позволяет точно спланировать положение такой скважины для перехвата подземных вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Участок разгрузки подземных вод и образования наледи у подножия горы Мишельдык является типичным для Чуйской впадины Горного Алтая и классическим примером гидрогеогенной наледи. На месте разгрузки подземных вод зимой образуется сезонный бугор пучения – гидролакколит, на котором, в свою очередь, растет наледный бугор.

С помощью георадиолокации 400 МГц и бурения установлено, что максимальная толщина льда на вершине наледного бугра на момент исследований не превышала 0.45 м, следовательно, положительная форма рельефа сформирована в основном гидролакколитом.

Результаты площадной георадиолокации дали возможность оценить глубину сезонного промерзания, которая составила 1.8–2.7 м, и выявить аномально малые (1.3 м) ее значения над каналами разгрузки подземных вод. Несколько таких аномалий свидетельствуют о групповом выходе подземных вод в зоне разгрузки.

Методом БИЭП показано, что под бугром пучения на геоэлектрическом разрезе присутствует вертикальная аномалия пониженного сопротивления, интерпретируемая как гидрогеогенный талик в разломной зоне, по которому разгружаются подземные воды.

Интерпретация результатов двумерной электротомографии затруднена тем, что в верхней час-

ти разреза присутствуют породы разного литологического состава, льдистости и засоленности. Это осложняет однозначное выделение многолетнемерзлых пород. С уверенностью можно выделить лишь участки сильнольдистых или обводненных пород. По градиентной границе уменьшения УЭС пород на глубине 65–70 м выделена предполагаемая подошва многолетнемерзлых пород, положение которой согласуется с данными бурения в этом районе.

Трехмерная инверсия данных ЭТ–ВП показала, что под местом образования гидролакколита прослеживается на всю глубину зондирования (до 100 м) вертикальная структура пониженного сопротивления, интерпретируемая как канал разгрузки подземных вод в разломной зоне. Еще отчетливее этот канал и его ветвление в верхней части разреза оконтуриваются аномалией нормированной заряжаемости.

Установлено, что параметр “нормированная заряжаемость” обратно пропорционален квадрату электрической извилистости пор, которая примерно равна гидродинамической извилистости. При фильтрации воды в горных породах происходит суффозионный вынос мелких частиц и спрямление токовых путей. Это объясняет интенсивные аномалии нормированной заряжаемости в местах фильтрации грунтовых и подземных вод, в том числе из гидротехнических сооружений и свалок, наблюдаемые ранее другими исследователями.

Выявление каналов фильтрации в области питания наледей даст возможность планировать инженерные мероприятия по перехвату подземных вод и снижению наледной опасности.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) “Геоэлектрические и электромагнитные методы исследования верхней части земной коры: теория, модели, эксперимент” (FWZZ-2022-0024).

Литература

- Алексеев В.Р.** Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2021, 302 с.
- Баишев Н.Е., Шепелев В.В., Гагарин Л.А.** О закономерностях распространения наледей на федеральной автодороге А-360 “Лена” по данным мультиспектральных космических снимков // Природ. ресурсы Арктики и Субарктики, 2021, т. 26, № 1, с. 60–69.
- Бойцов А. В.** Геокриология и подземные воды криолитозоны. Тюмень, ТюмГНГУ, 2011, 178 с.
- Верхотуров А.Г.** Многолетняя динамика наледей Центрального и Южного Забайкалья // Подземная гидросфера: Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием) (Екатеринбург, 21–28 июня 2024 г.). Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2024, с. 19–24.

- Владов М.Л.** Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений / М.Л. Владов, М.С. Судакова. М., Изд-во "Хорошее", 2017, 240 с.
- Геологический словарь** в 2-х томах / Под ред. К.Н. Паффенгольца и др. М., Недра, 1978, 455 с.
- Дахнов В.Н.** Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. 2-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1985, 310 с.
- Деев Е.В., Неведрова Н.Н., Зольников И.Д. и др.** Геоэлектрические исследования отложений Чуйской котловины (Горный Алтай) // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 1, с. 120–139.
- 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.
- Зольников И.Д., Деев Е.В., Лямина В.А.** Новые данные о четвертичном морфолитоогенезе в Чуйской котловине (Горный Алтай) // Геология и геофизика, 2010, т. 51, № 4, с. 437–449.
- Калганов А.С., Оленченко В.В., Осипова П.С.** Оценка влагонасыщенности рудной массы и поиск нарушений гидроизоляции при кучном выщелачивании золота // EAGE: Инженерная и рудная геофизика 2022: Сб. материалов 18-й науч.-практ. конф. и выставки (Геленджик, Россия, 5–8 сент. 2022 г.). М., ООО "ЕАГЕ Геомодель", 2022, с. 293–301.
- Кожевников Н.О., Никифоров С.П.** Изучение современных и погребенных речных долин Ленского района электроразведочными методами // Геоэкология, 1997, № 2, с. 100–110.
- Мерзлотно-гидрогеологическая карта** м-ба 1:200 000. Новосибирск, Отдел фондов Зап.-Сиб. геол. управления; инв. № 18195, 1977, 240 с.
- Оленченко В.В., Гагарин Л.А., Христофоров И.И. и др.** Строение участка развития термосуффузионных процессов в пределах бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 5, с. 16–26.
- Оленченко В.В., Макарьева О.М., Землянскова А.А. и др.** Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) // Геодинамика и тектонофизика, 2023, т. 14, № 3, 0702.
- Оленченко В.В., Макарьева О.М., Землянскова А.А. и др.** Геокриологические условия формирования гигантской наледи подземных вод р. Анмангында (Магаданская область) по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика, 2024, т. 15, № 2, 0753.
- 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 Междунар. науч. конф. (Новосибирск, 18–20 мая 2022 г.). Новосибирск, ИНГ СО РАН, 2022, т. 2, № 3, с. 59–65.
- Романовский Н.Н.** Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 231 с.
- Свод правил.** СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 / В.П. Петрухин, И.В. Колыбин, В.Г. Федоровский и др. М., ФАУ "ФЦС", 2012, 65 с.
- Черных В.Н.** Распространение и динамика наледей в Селенгинском среднегорье // Изв. Рус. геогр. о-ва, 2025, т. 156, № 2, с. 155–168.
- Шац М.М.** Геокриологические условия Алтае-Саянской горной страны. Новосибирск, Наука, 1978, 103 с.
- Шестернев Д.М., Верхотуров А.Г.** Воздействие наледей на инженерные сооружения // Вестн. Забайкал. гос. ун-та, 2016, т. 22, № 10, с. 30–40.
- Шитов А.В.** Ландшафтное планирование как программа эколого-экономического развития Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай) // Степи Северной Евразии: Материалы VIII Междунар. симп. (Оренбург, 10–13 сент. 2018 г.). Оренбург, Ин-т степи УрО РАН, 2018, с. 1131–1134.
- Abdulsamad F., Revil A., Ahmed A.S. et al.** Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in embankments // Eng. Geology, 2019, vol. 254, p. 89–101.
- Arcone S.A., Chacho E.F., Delaney A.J.** Seasonal structure of taliks beneath arctic streams determined with ground-penetrating radar // Proc. of the Seventh Int. Permafrost Conf. Ottawa ON, Canada. Int. Permafr. Association, Can. Nat. Committee, 1998, p. 19–24.
- Elis V.R., Ustra A.T., Hidalgo-Gato M.C. et al.** Application of induced polarization and resistivity to the environmental investigation of an old waste disposal area // Environ. Earth Sci., 2016, vol. 75, p. 1–13.
- Fedorova O.I., Gorshkov V.Y.** Geoelectric monitoring of earthen hydraulic structure state by resistivity and induced polarization methods: mine water settling pond dam case study // Russ. J. Earth Sci., 2023, vol. 23, No. 4, p. 4011.
- Lesmes D.P., Frye K.M.** Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone // J. Geophys. Res.: Solid Earth, 2001, vol. 106, No. B3, p. 4079–4090.
- 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 // Permafr. Periglac. Process., 2021, vol. 32, No. 3, p. 468–483.
- O'Neill H.B., Roy-Léveillé P., Lebedeva L., Ling F.** Recent advances (2010–2019) in the study of taliks // Permafr. Periglac. Process., 2020, vol. 31, No. 3, p. 346–357.
- Slater L., Lesmes D.P.** Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments // Water Resour. Res., 2002, vol. 38, No. 10, p. 31–1–31–13.
- Terry N., Grunewald E., Briggs M. et al.** Seasonal subsurface thaw dynamics of an aufeis feature inferred from geophysical methods // J. Geophys. Res.: Earth Surface, 2020, vol. 125, No. 3, e2019JF005345.
- Turcotte B., Dubnick A., McKillop R.** Icing and aufeis in cold regions II: Consequences and mitigation // Can. J. Civil Eng., 2023, vol. 51, No. 2, p. 125–139.
- 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 Geophys., 2006, vol. 4, No. 5, p. 305–311.
- Ustra A.T., Elis V.R., Mondelli G. et al.** Case study: A 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil // Environ. Earth Sci., 2012, vol. 66, p. 763–772.
- Walther M., Batsaikhan V., Dashtseren A. et al.** The formation of aufeis and its impact on infrastructure around Ulaanbaatar, north-central Mongolia // Exp. Biol. Resour. Mongolia, 2021, vol. 14, p. 385–398.
- Walvoord M.A., Voss C.I., Ebel B.A., Minsley B.J.** Development of perennial thaw zones in boreal hillslopes enhances potential mobilization of permafrost carbon // Environ. Res. Lett., 2019, vol. 14, No. 1, p. 015003.

You Y., Yang M., Yu Q. et al. Investigation of an icing near a tower foundation along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line // *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2016, vol. 121, p. 250–257.

References

- Alekseev V.R. Atlas gigantiskikh naledei-tarynov Severo-Vostoka Rossii [Atlas of Giant Aueis-Taryns of the Northeast of Russia]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2021, 302 p. (in Russian).
- Baishev N.E., Shepyolov V.V., Gagarin L.A. On the regularities of aueis distribution on the federal highway A-360 “Lena” according to multispectral satellite images. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki* [Natural Resources of the Arctic and Subarctic], 2021, vol. 26, No. 1, p. 60–69 (in Russian).
- Boytsov A.V. *Geokriologiya i podzemnye vody kriolitozony* [Geocryology and Underground Waters of the Cryolithozone]. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University, 2011, 178 p. (in Russian).
- Verkhoturov A.G. Long-term dynamics of aueis in Central and Southern Transbaikalia. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vserossiyskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii* [Underground Hydrosphere: Proceedings of the All-Russian Meeting on Underground Waters of the East of Russia]. Yekaterinburg, Institute of Mining UB RAS, 2024, p. 19–24 (in Russian).
- Vladov M.L., Sudakova M.S. *Georadiolokatsiya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravleniy* [Ground Penetrating Radar. From Physical Foundations to Advanced Directions]. Moscow, Izd-vo “Khoroshee”, 2017, 240 p. (in Russian).
- Geologicheskii slovar v 2-kh tomakh* [Geological Dictionary in 2 volumes]. K.N. Paffengoltz et al. (eds.). Moscow, Nedra, 1978, 455 p. (in Russian).
- Dakhnov V.N. *Geofizicheskie metody opredeleniya kolektor-skikh svoystv i neftegazonasyshcheniya gornykh porod* [Geophysical Methods for Determining Reservoir Properties and Oil-Gas Saturation of Rocks]. 2nd ed. Moscow, Nedra, 1985, 310 p. (in Russian).
- Deev E.V., Nevedrova N.N., Zolnikov I.D. et al. Geoelectrical studies of the Chuya Basin deposits (Gorny Altai). *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2012, vol. 53, No. 1, p. 120–139 (in Russian).
- Dostovalova M.S., Shitov A.V. Influence of meteorological characteristics and geodynamic activity on the regime of hydrogenic aueis formation in the Altai Mountains. *Georisk* [Georisk], 2011, No. 4, p. 36–43 (in Russian).
- Zolnikov I.D., Deev E.V., Lyamina V.A. New data on Quaternary morpholithogenesis in the Chuya Basin (Gorny Altai). *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2010, vol. 51, No. 4, p. 437–449 (in Russian).
- Kalganov A.S., Olenchenko V.V., Osipova P.S. Assessment of ore moisture saturation and detection of hydraulic insulation breaches in heap leaching of gold. In: *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2022: Sbornik materialov 18-y nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki* [Engineering and Ore Geophysics 2022: Proc. of the 18th Scientific and Practical Conf. and Exhibition] (Gelendzhik, Russia, September 5–8, 2022). Moscow, EAGE Geomodel LLC, 2022, p. 293–301 (in Russian).
- Kozhevnikov N.O., Nikiforov S.P. Study of modern and buried river valleys of the Lensky District by electrical prospecting methods. *Geoekologiya* [Geoecology], 1997, No. 2, p. 100–110 (in Russian).
- Merzlotno-gidrogeologicheskaya karta m-ba 1:200 000 [Permafrost-Hydrogeological Map, scale 1:200 000]. Novosibirsk, West Siberian Geological Administration, 1977, 240 p. (in Russian).
- Olenchenko V.V., Gagarin L.A., Khristoforov I.I. et al. The structure of a site with thermo-suffosion processes within Bestyakh terrace of the Lena River, according to geophysical data. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 5, p. 14–23.
- Olenchenko V.V., Makaryeva O.M., Zemlyanskova A.A. et al. *Geofizicheskie priznaki istochnikov gigantskoi naledi na R. Anmangynda (Magadanskaya oblast')* [Geophysical Indicators of the Giant Aueis Sources on the Anmangynda River (Magadan Region)]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and Tectonophysics], 2024, vol. 14, No. 3, Art. 0702 (in Russian).
- Olenchenko V.V., Makaryeva O.M., Zemlyanskova A.A. et al. *Geocryological Conditions of Formation of the Giant Ground-water Aueis of the Anmangynda River (Magadan Region) from Geophysical Data*. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and Tectonophysics], 2024, vol. 15, No. 2, Art. 0753 (in Russian).
- Potapov V.V., Makaryeva O.M., Olenchenko V.V. *Geoelectric structure of the section at the Anmangyndinskaya Aueis (Magadan Region) from TEM Data*. In: *Interespo GEO-Sibir – “Nedropolzovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiskov, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Ekonomika. Geoekologiya”*: Materialy XVIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Interexpo GEO-Siberia – “Subsoil Use. Mining. Directions and Technologies for Prospecting, Exploration, and Development of Mineral Deposits. Economics. Geoecology”: Proc. of the XVIII Int. Sci. Conf.] (Novosibirsk, May 18–20, 2022). Novosibirsk, IGM SB RAS, 2022, vol. 2, No. 3, p. 59–65 (in Russian).
- Romanovsky N.N. *Podzemnye vody kriolitozony* [Underground Waters of the Cryolithozone]. Moscow, Moscow University Press, 1983, 231 p. (in Russian).
- Set of Rules SP 116.13330.2012. *Inzhenernaya zashchita territoriy, zdaniy i sooruzheniy ot opasnykh geologicheskikh protsessov* [Engineering Protection of Territories, Buildings, and Structures from Hazardous Geological Processes]. V.P. Petrukhin, I.V. Kolibin, V.G. Fedorovski et al. (eds.). Moscow, FAI “FCS”, 2012, 65 p. (in Russian).
- Chernykh V.N. Distribution and dynamics of aueis in the Selenga Highlands. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Proceedings of the Russian Geographical Society], 2025, vol. 156, No. 2, p. 155–168 (in Russian).
- Shats M.M. *Geokriologicheskie usloviya Altay-Sayanskoy gornoy strany* [Geocryological Conditions of the Altai-Sayan Mountain Country]. Novosibirsk, Nauka, 1978, 103 p. (in Russian).
- Shesternev D.M., Verkhoturov A.G. Impact of aueis on engineering structures. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Transbaikal State University], 2016, vol. 22, No. 10, p. 30–40 (in Russian).
- Shitov A.V. Landscape planning as a program for ecological and economic development of the Chui Intermountain Basin (Republic of Altai). In: *Stepi Severnoy Evrazii: Materialy VIII mezhdunarodnogo simpoziuma* [Steppes of Northern Eurasia: Proceedings of the VIII International Symposium] (Orenburg, September 10–13, 2018). Orenburg, Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018, p. 1131–1134 (in Russian).
- Abdulsamad F., Revil A., Ahmed A.S. et al. Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in embankments. *Eng. Geology*, 2019, vol. 254, p. 89–101.
- Arcone S.A., Chacho E.F., Delaney A.J. Seasonal structure of taliks beneath arctic streams determined with ground-penetrating radar. In: *Proc. of the Seventh Int. Permafrost Conf.* Ottawa, Canada, Int. Permafr. Association, Can. Nat. Committee, 1998, p. 19–24.
- Elis V.R., Ustra A.T., Hidalgo-Gato M.C. et al. Application of induced polarization and resistivity to the environmental inves-

- tigation of an old waste disposal area. *Environ. Earth Sci.*, 2016, vol. 75, p. 1–13.
- Fedorova O.I., Gorshkov V.Y. Geoelectric monitoring of earthen hydraulic structure state by resistivity and induced polarization methods: Mine water settling pond dam case study. *Russ. J. Earth Sci.*, 2023, vol. 23, No. 4, p. 4011.
- Lesmes D.P., Frye K.M. Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2001, vol. 106, No. B3, p. 4079–4090.
- 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. *Permafr. Periglac. Process.*, 2021, vol. 32, No. 3, p. 468–483.
- O'Neill H.B., Roy-Léveillé P., Lebedeva L., Ling F. Recent advances (2010–2019) in the study of taliks. *Permafr. Periglac. Process.*, 2020, vol. 31, No. 3, p. 346–357.
- Slater L., Lesmes D.P. Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments. *Water Resour. Res.*, 2002, vol. 38, No. 10, p. 31–1–31–13.
- Terry N., Grunewald E., Briggs M. et al. Seasonal subsurface thaw dynamics of an aufeis feature inferred from geophysical methods. *J. Geophys. Res.: Earth Surface*, 2020, vol. 125, No. 3, e2019JF005345.
- Turcotte B., Dubnick A., McKillop R. Icing and aufeis in cold regions II: Consequences and mitigation. *Can. J. Civil Eng.*, 2023, vol. 51, No. 2, p. 125–139.
- 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 Geophys.*, 2006, vol. 4, No. 5, p. 305–311.
- Ustra A.T., Elis V.R., Mondelli G. et al. Case study: A 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil. *Environ. Earth Sci.*, 2012, vol. 66, p. 763–772.
- Walther M., Batsaikhan V., Dashtseren A. et al. The formation of aufeis and its impact on infrastructure around Ulaanbaatar, north-central Mongolia. *Exp. Biol. Resour. Mongolia*, 2021, vol. 14, p. 385–398.
- Walvoord M.A., Voss C.I., Ebel B.A., Minsley B.J. Development of perennial thaw zones in boreal hillslopes enhances potential mobilization of permafrost carbon. *Environ. Res. Lett.*, 2019, vol. 14, No. 1, p. 015003.
- You Y., Yang M., Yu Q. et al. Investigation of an icing near a tower foundation along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2016, vol. 121, p. 250–257.

*Поступила в редакцию 4 апреля 2025 г.,
после доработки – 23 июня 2025 г.,
принята к публикации 1 сентября 2025 г.*