

УДК 550.83.04

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ

Мария Сергеевна Судакова¹✉, Анатолий Викторович Брушков²,
Сергей Александрович Великин³, Михаил Львович Владов⁴,
Юрий Дмитриевич Зыков⁵, Виталий Владимирович Неклюдов⁶,
Владимир Владимирович Оленченко⁷, Павел Юрьевич Пушкарев⁸,
Марат Ринатович Садуртдинов⁹, Андрей Георгиевич Скворцов¹⁰,
Андрей Михайлович Царев¹¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.s.sudakova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8680-125X>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; brushkov@geol.msu.ru

³ Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия; frozen@mirny.sakha.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vladov_ml@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2955-3552>

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; zikov@mail.ru

⁶ Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия; frozen@mirny.sakha.ru

⁷ Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия; olenchenkovv@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-4386-7064>

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; pavel_pushkarev@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2894-2609>

⁹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия; mr_sadurtdinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7225-6684>

¹⁰ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия; agskvortsov@mail.ru

¹¹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия; tsarev.am@gmail.com

Аннотация. Обоснована необходимость использовать геофизические методы в геокриологическом мониторинге для изучения условий залегания многолетнемерзлых пород, поиска таликов и криопёгов, определения физико-механических свойств мерзлых пород. Описаны достоинства и недостатки этих методов, а также приведены примеры их использования для решения геокриологических задач, как в естественных условиях, так и в зоне влияния зданий и инженерных сооружений.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, геокриологический мониторинг, геофизические методы, сейсморазведка, электроразведка, георадиолокация

Для цитирования: Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А., Владов М.Л., Зыков Ю.Д., Неклюдов В.В., Оленченко В.В., Пушкарев П.Ю., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 141–151.

GEOPHYSICAL METHODS IN PERMAFROST MONITORING

Maria S. Sudakova¹, Anatoly V. Brushkov², Sergey A. Velikin³, Mikhail L. Vladov⁴,
Yuri D. Zikov⁵, Vitaly V. Nekljudov⁶, Vladimir V. Olenchenko⁷, Pavel Yu. Pushkarev⁸,
Marat R. Sadurtdinov⁹, Andrey G. Skvortsov¹⁰, Andrey M. Tsarev¹¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia; m.s.sudakova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8680-125X>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; brushkov@geol.msu.ru

³ Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia; frozen@mirny.sakha.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vladov_ml@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2955-3552>

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; zikov@mail.ru

⁶ Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia; frozen@mirny.sakha.ru

⁷ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia; olenchenkovv@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-4386-7064>

⁸ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; pavel_pushkarev@list.ru <https://orcid.org/0000-0003-2894-2609>

⁹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia; mr_sadurtdinov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7225-6684>

¹⁰ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia; agskvortsov@mail.ru

¹¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia; tsarev.am@gmail.com

Abstract. The paper substantiates the need to use geophysical methods in geocryological monitoring to study the conditions of permafrost, search for taliks and cryopegs, and determine the physical and mechanical properties of frozen grounds. Their advantages, disadvantages and examples of their use for solving geocryological problems are described both in natural conditions and in the zone of influence of buildings and engineering structures.

Key words: permafrost, geocryological monitoring, geophysical methods, seismic exploration, electrical exploration

For citation: Sudakova M.S., Brushkov A.V., Velikin S.A., Vladov M.L., Zykov Yu.D., Nekljudov V.V., Olenchenko V.V., Pushkarev P.Yu., Sadurtdinov M.R., Skvortsov A.G., Tsarev A.M. Geophysical methods in permafrost monitoring. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 6: 141–151. (In Russ.).

Введение. При освоении Арктики необходимо учитывать изменения климата. Повышение температуры верхних горизонтов криолитозоны, которая занимает 65% территории России и определяет ключевые условия природной среды, экономической деятельности и жизни местного населения, вызовет потерю устойчивости оснований зданий и инженерных сооружений. Только для Арктической зоны РФ предполагаемый ущерб экономике может быть оценен к 2050 г. в 5–7 трлн руб. [Мельников и др., 2021]. Ситуация в Арктике стала критической: число деформированных зданий приближается к 40% (в Амдерме около 40%, в Диксоне — 33%, в Тикси — 22%, в Певеке — 50%). Вечная мерзлота распространена и за пределами Арктики, в частности, в Якутии она занимает 95% ее территории.

Обеспечить устойчивость инфраструктуры сможет система геокриологического мониторинга. Однако его реализация требует всестороннего анализа возможностей наук о Земле, в том числе геофизики — современного инструмента исследований. Возможности геофизических методов недостаточно обсуждаются в литературе и мало учитываются при проектировании мониторинга. Сегодня, судя по публикациям в печати [https://www.mnr.gov.ru/press/news/sozдание_sistemy_monitoringa_vechnoy_merzloty_plany_nauchnykh_ekspeditsiy_ledostoykoy_platformy_itog/], Минприроды России идет по пути создания сети наблюдений исключительно для анализа теплового состояния мерзлоты в природных (фоновых) условиях. Вне сферы такого мониторинга оказываются осваиваемые и застроенные территории и опасные мерзлотные процессы. В крупных населенных пунктах температура грунтов отличается на 3–6 °С от температуры в природных условиях. Вместо решения важной государственной задачи предлагается лишь расширение существующей фоновой сети. Наблюдения необходимо проводить не только за температурой грунтов, но и за другими параметрами, необходимыми для прогноза развития опасных природных процессов. Для определения этих параметров — свойств снежного и растительного покрова, состава и строения грунтов верхних горизонтов литосферы, их теплофизических, физико-механических и других характеристик — могут и должны быть использованы геофизические методы. В статье обсуждаются возможности применения геофизических методов исследований для решения задач мониторинга вечной мерзлоты.

В основе наблюдательной сети за состоянием вечной мерзлоты лежит строительство термометрических скважин. Температура — основа для опре-

деления характеристик мерзлой толщи — ее пространственного положения и механических свойств, необходимых для оценки устойчивости оснований зданий и сооружений. Геофизические методы значительно дополняют изучение разреза. Это неразрушающие методы исследований, они применяются на земной поверхности, в пределах акваторий, в скважинах, а также дистанционно (аэрогеофизика). При проведении геофизических работ практически не нарушается напочвенный покров, что особенно актуально в тундре, где его уничтожение вызывает термокарст и другие негативные процессы. Геофизические методы, в отличие от бурения, обеспечивают получение непрерывной информации по глубине и простиранию, а также об изменчивости состояния и свойств многолетнемерзлых пород (ММП).

Важно отметить, что не всегда по температурным данным можно определить состояние пород (мерзлое/талое). Геофизические методы помогают ответить на этот вопрос. Они обеспечивают получение информации о физических, физико-механических характеристиках среды, включая деформационные и прочностные, которые необходимы для расчета оснований сооружений. Геофизический мониторинг, таким образом, позволяет оценить изменение несущей способности мерзлых пород.

В нормативных документах рекомендуется стационарные геофизические наблюдения проводить на специально оборудованных пунктах наблюдательной сети с закрепленными датчиками и приемниками или по сети, определенной на местности при инженерно-геологических изысканиях [СП–11–105–97–6, 2004]. Периодичность наблюдений должна обеспечивать регистрацию экстремальных значений изменения компонентов геологической среды в конкретных условиях. На практике подобные стационарные сети организуются крайне редко, а наблюдения за состоянием криолитозоны (фоновый мониторинг) часто ограничены исследованиями сезонно-талого слоя (СТС) (например, в программе CALM, <https://arcticdata.io/catalog/portals/CALM/About>).

Цель мониторинга вечной мерзлоты (или мониторинга криолитозоны) — оценка ее строения и состояния как в естественных условиях, так и на освоенных территориях, а также разработка прогноза ее изменения под влиянием природных и антропогенных факторов. К задачам геокриологических исследований, в том числе геофизического мониторинга, особенно в условиях техногенного воздействия, относятся определение положения кровли ММП; изучение строения толщи ММП с

выделением подземных льдов, таликов и криопэгов, областей газовых скоплений, зон фильтрации и др.; оценка физико-механических свойств ММП и их изменения; мониторинг и прогноз склоновых (морские и речные береговые склоны, борта карьеров) и иных процессов, приводящих к нарушению грунтового массива.

Уже накоплен большой опыт полевых и лабораторных геофизических исследований мерзлых пород, разработаны методики исследований, доказавшие свою эффективность [Мельников и др., 2010; Скворцов 1997; Скворцов и др., 2011; Садуртдинов и др., 2011; Крылов, Бобров, 2002; Оленченко, Кондратьев, 2017; Селяев и др., 2017; Ермаков, Старовойтов, 2010; Садуртдинов и др., 2016; Ельцов, Оленченко, 2017; Судакова и др., 2019; Кошурников и др., 2020].

Обоснование применения геофизических методов. При переходе температуры через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в горных породах происходит не только фазовый переход воды, но и качественное преобразование их состава, строения и свойств [Ершов, 2002]. При этом существенно меняются и геофизические свойства [Зыков, 2007; Фролов, 1998; Джурик, 1982; Воронков, Фролов, 1992; Омеляненко, 2001; Судакова, Владов, 2020].

Скорость распространения упругих волн при переходе пород в мерзлое состояние возрастает. Это связано с различием значений скорости упругих волн во льду и в воде. Скорость продольных волн (V_p) во льду составляет 3100–4200 м/с, а в воде –1450 м/с. Скорость поперечных волн (V_s) во льду составляет 1600–2100 м/с, в воде она равна нулю. Важную роль играет цементирующее влияние льда. Так, при промерзании грубодисперсных пород значения V_p возрастают в 3–5 раз, а V_s — в 5–15 раз, в тонкодисперсных породах, где больше незамерзшей воды, — в 1,5–3 и 5–7 раз соответственно. При промерзании трещиноватых скальных пород значения скорости упругих волн возрастают обычно не более чем в 2–3 раза. В скальных массивах при отсутствии трещиноватости при переходе температуры через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость упругих волн практически не изменяется.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) пресных льдов очень высокое (10^5 – 10^8 Ом·м), а льдов из минерализованных вод ниже (10^2 – 10^4 Ом·м) и зависит от содержания и состава в них солей. Поэтому при промерзании горных пород их УЭС возрастает: в скальных породах не более чем в 10 раз, в тонкодисперсных рыхлых породах (глины, суглинки) в 10–100 раз, в грубодисперсных породах (пески, гравийно-галечниковые отложения) в 100–1000 раз.

Электрохимическая активность мерзлых и талых пород может значительно различаться вследствие наличия и движения надмерзлотных и межмерзлотных вод. Вызванная поляризация мерзлых пород выше, чем талых, и достигает 2–3% для мелкодисперсных пород, 10% — для льда и 15% — для грубодисперсных. Относительная диэлектрическая проницаемость воды составляет 80, т. е. на порядок

выше, чем для большинства породообразующих минералов, а для льда ее значение равно 4. Таким образом, при промерзании пород значение относительной диэлектрической проницаемости убывает с уменьшением содержания незамерзшей воды. Некоторые зависимости физических свойств мерзлых пород приведены на рис. 1.

Геофизические методы при геокриологическом мониторинге. Ведущие методы в геофизике криолитозоны — сейсморазведочные и электроразведочные, в том числе георадиолокация. У каждой из этих групп методов есть свои достоинства и недостатки.

К достоинством *сейсмических методов* относится то, что на основании определенных критериев [Скворцов и др., 2014] возможна однозначная идентификация мерзлого состояния пород. Другое преимущество — возможность непосредственного расчета динамических модулей упругости с последующей оценкой прочностных и деформационных характеристик пород в естественном залегании. К недостаткам сейсмических методов следует отнести их трудоемкость и высокую стоимость. Выбор сейсмических методов для целей мониторинга определяется характером решаемой задачи, особенностями строения разреза [Скворцов, 1997] и временем года, когда выполняются исследования. Предпочтительнее использовать поперечные *SH*-волны. При выполнении режимных исследований необходимо соблюдать идентичность сети наблюдений и условий их проведения.

Среди *электроразведочных методов* для изучения мерзлых толщ чаще применяют группу методов сопротивления. Их эффективность обусловлена контрастным различием мерзлых и талых пород по УЭС, которое может отличаться на порядки [Огильви, 1998; Зыков, 2007]. В случае глинистых или засоленных пород контрастность свойств снижается, что ограничивает возможности этих методов. Преимущество — хорошая разрешающая способность в высокоомных средах (выделение слабопроводящих объектов на фоне среды с повышенным УЭС). К недостаткам группы методов сопротивления относится необходимость устройства гальванических заземлений, что накладывает сезонные ограничения на производство работ. Кроме того, опыт показывает, что при УЭС мерзлых пород и льдов, достигающем 100 кОм·м и более, эти породы становятся непроводящим экраном для постоянного тока, что уменьшает глубинность исследований и делает невозможным определение мощности мерзлой толщи.

Электротомография (ЭТ) эффективна для решения задач мониторинга на многих объектах, однако у этого метода есть ограничения [Ельцов и др., 2017]. В присутствии металлических объектов, таких, как сваи или обсадные трубы на кустах скважин, возникают ложные аномалии низкого сопротивления, которые затрудняют интерпретацию разрезов. Кроме того, при высокой засоленности

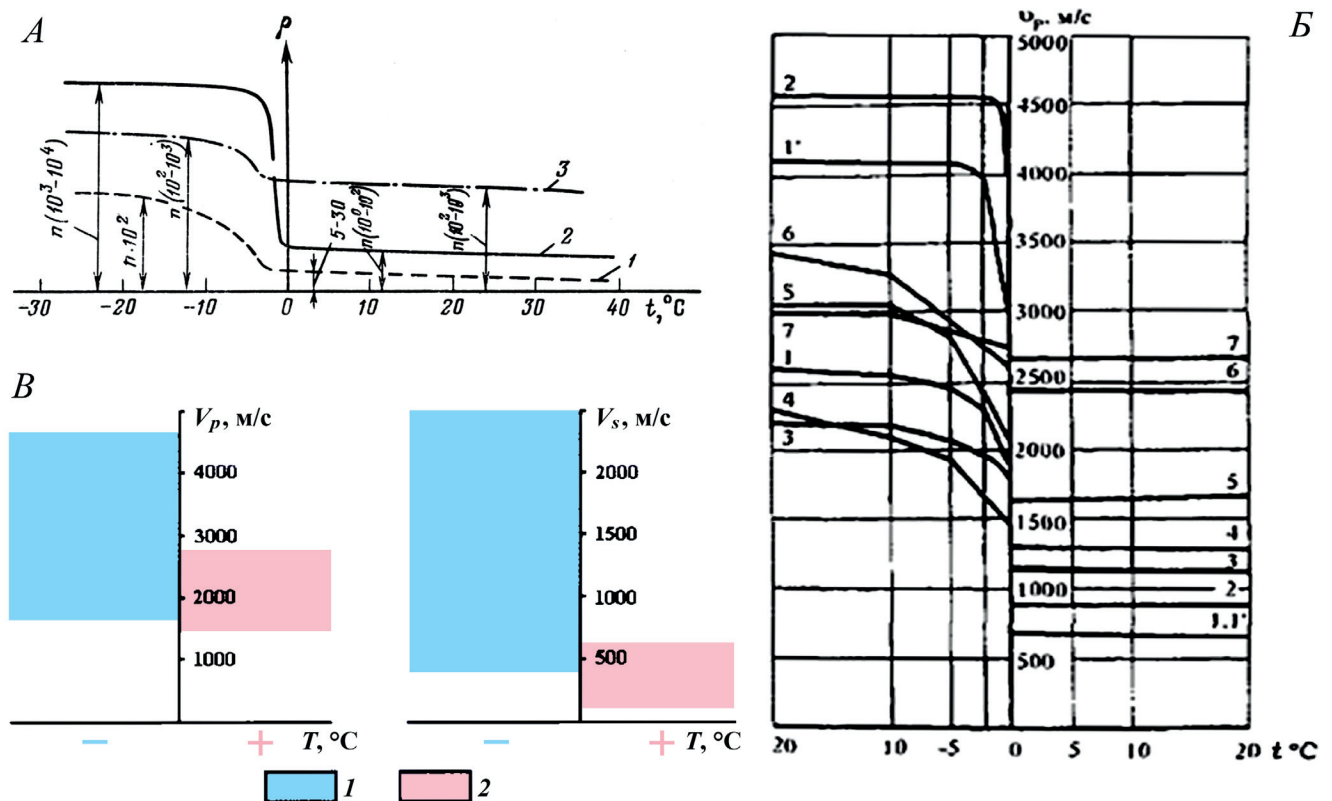


Рис. 1. Зависимости геофизических параметров горных пород от температуры для: А — удельного электрического сопротивления: 1 — скальные породы; 2 — пески; 3 — глины, по [Огильви, 1990]; Б — скорость продольных волн в различных типах пород (естественная влажность $W = 10 \div 15\%$): 1 — песок глинистый, 1' — кварцевый песок ($W = 19\%$), 2 — галечник ($W_c = 15\%$), 3 — переслаивание глины и песка, 4 — глина, 5 — песчаник, 6 — мергель, 7 — мел, по [Фролов, 1998]; В — диапазоны значений скорости продольных и поперечных волн в мерзлых (1) и талых (2) водонасыщенных неконсолидированных песчано-глинистых породах [Скворцов и др., 2014]

(>5 г/л) породы не различаются по УЭС, однако на их фоне возможно выделение подземных льдов.

Другие методы электроразведки (электромагнитные, аэроэлектроразведка, радиоволновое просвечивание, метод вызванной поляризации и пр.) для решения геокриологических задач применяются реже.

Метод георадиолокации основан на изучении разреза с помощью высокочастотных электромагнитных волн. Кровля ММП представляет собой для них контрастную границу, что позволяет использовать георадиолокацию для определения ее глубины и выделения таликов [Ермаков, Старовойтов, 2010; Омеляненко, 2001; Садуртдинов и др., 2016; Старовойтов, 2008; Schwamborn, 2002; Shean, Marchant, 2010; Sudakova et al., 2017]. Этот метод наименее трудоемок по сравнению с описанными выше. К недостаткам можно отнести небольшую глубину, чаще всего 10–15 м (исключение — изучение ледников). Кроме того, в глинистых или засоленных грунтах георадиолокация, как правило, не применима [Владов, Судакова, 2017].

Результаты исследований и их обсуждение.
Определение динамики кровли ММП. На рис. 2 приведен пример использования сейсмических исследований методом преломленных волн (МПВ) для мониторинга кровли ММП. На стационаре в районе Уренгойского месторождения наземные наблюдения

проводились вместе со скважинными сейсмическими исследованиями и термометрией. Достоверность определения положения кровли ММП в условиях этого высокотемпературного разреза по данным сейсмического каротажа выше, чем у термометрии. Наземные наблюдения дают более детальную информацию о динамике положения кровли ММП, чем скважинные. Наблюдается тенденция к опусканию кровли ММП, что подтверждено данными бурения (рис. 2). Глубина кровли ММП за 10 лет увеличилась на 1,8–3,8 м. На стационаре Кумжа на р. Печора в течение 4 лет также наблюдается тенденция к увеличению глубины кровли ММП в среднем на 30 см/год.

На рис. 3, 4 приведены результаты георадиолокационных наблюдений по одному из профилей на геокриологическом стационаре Кашин (Ненецкий автономный округ, устье р. Печора). В таблице представлены обобщенные результаты измерений на этом стационаре [Sudakova et al., 2021]. Средняя температура горных пород приведена по результатам измерений в непосредственной близости от площадки наблюдений. Отмечена корреляция между данными измерения среднегодовой температуры, мощности СТС и влажности горных пород (таблица). Средняя мощность СТС в 2016 г. на площадке была на 30% больше, чем в 2015 и в 2017 гг.; в 2017 г. средняя глубина протаивания практически вернулась к ее значению в 2015 г. Средняя объемная влажность

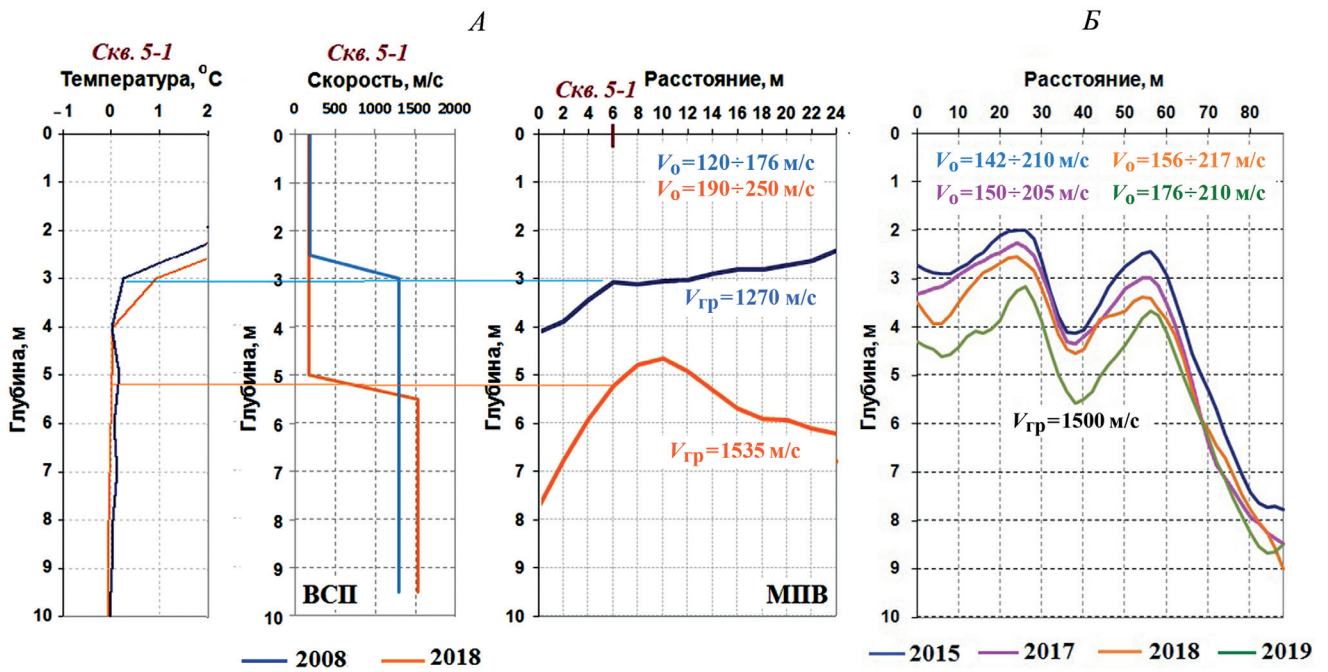


Рис. 2. Результаты режимных сейсмических наблюдений за положением кровли ММП на стационарах в районе Уренгойского месторождения (А) и Кумжа (Ненецкий автономный округ, пойма р. Печора) (Б)

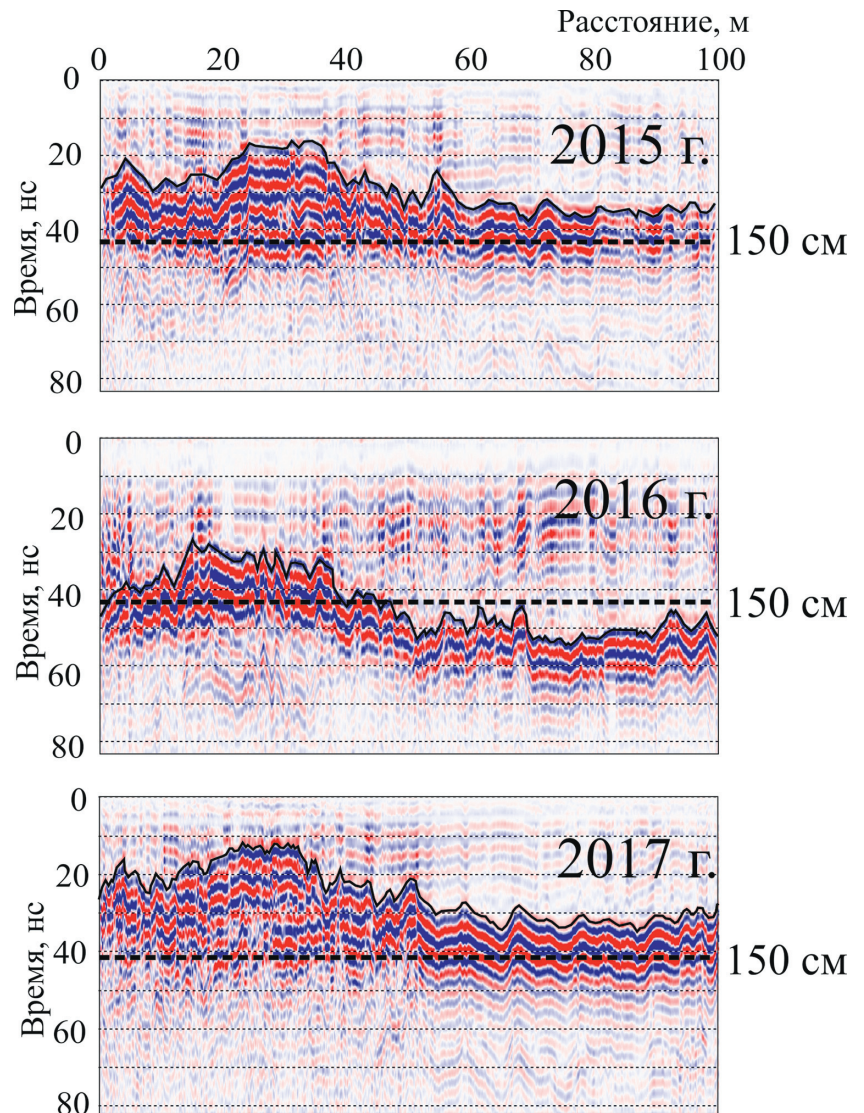


Рис. 3. Георадарограммы, полученные методом профилирования на геокриологическом стационаре Кашин в 2015–2017 гг. Черная линия — ось синфазности, соответствующая подошве СТС. Пунктиром показана линия, соответствующая глубине 150 см с постоянной скоростью 7 см/нс

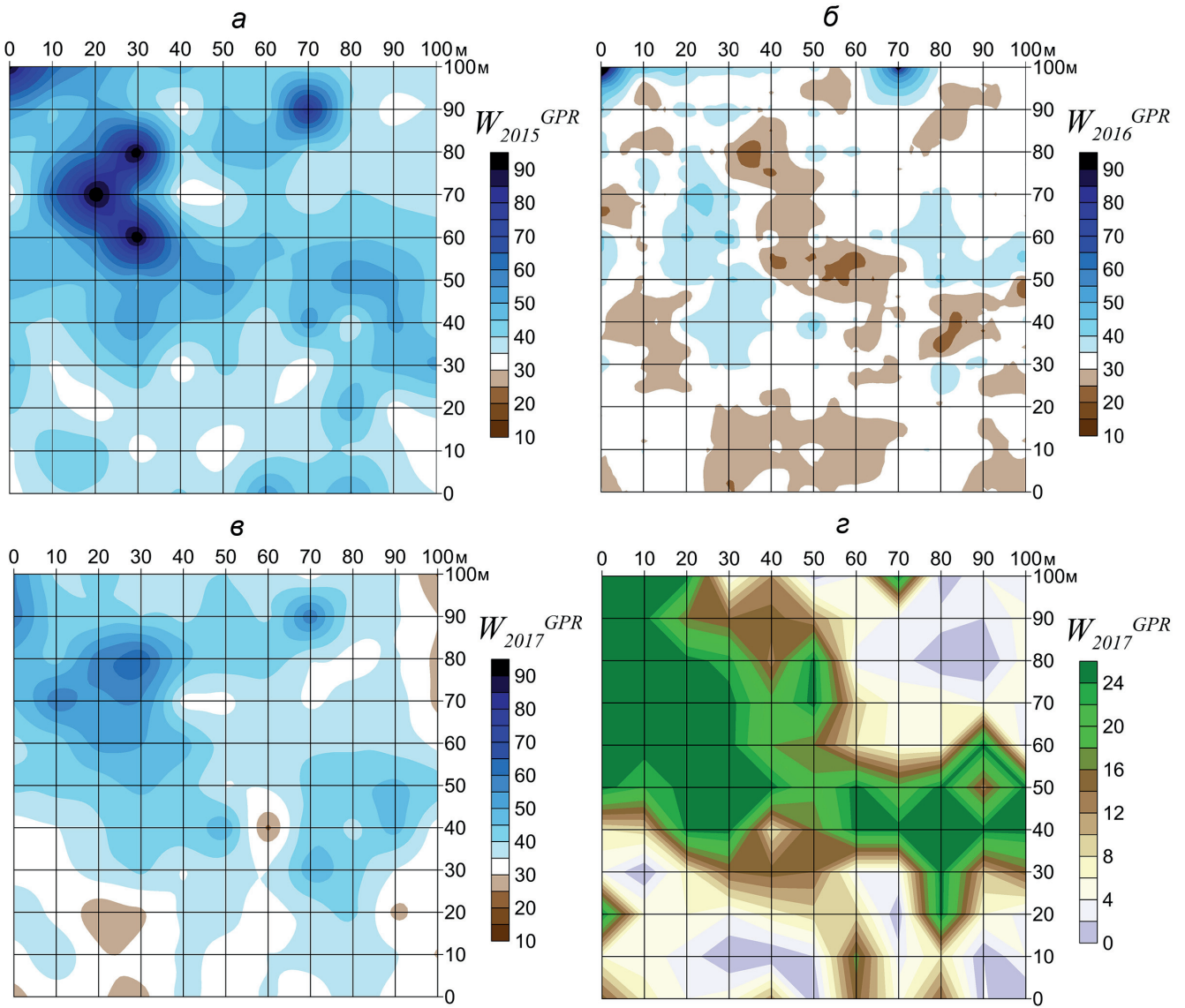


Рис. 4. Рассчитанная по данным георадиолокации объемная влажность СТС, % ($W_{об}$) на стационаре Кашин (CALM R24A-1) в 2015 (а), 2016 (б) и 2017 (в) годах; г — мощность торфа, см

($W_{об}$) в 2016 г. на 30% меньше средних значений в 2015 и 2017 гг.: аномально жаркий 2016 г. привел к высыханию СТС.

Георадиолокационные исследования, очевидно, эффективно применять для мониторинга состояния вечной мерзлоты в основаниях автодорог и других линейных сооружений в составе геотехнического мониторинга (ГТМ).

Электрометрический контроль состояния льдистых грунтов и пластовых льдов методом ЭТ. В качестве примера применения ЭТ для мониторинга состояния мерзлых пород на рис. 5 приведены результаты наблюдений за изменением УЭС разреза в пределах рекультивированного участка развития термоэрозии (рис. 5). Исследуемый участок расположен на территории Бованенковского газоконденсатного месторождения (ГКМ) (п-ов Ямал). Развивающаяся по пластовым льдам термоэрозия угрожала опоре высоковольтной ЛЭП. На момент

Результаты мониторинга на стационаре Кашин по термическим и георадиолокационным данным

Период	Средняя температура горных пород, °С	Полевой сезон	Кашин (CALM R24A-1)	
			мощность СТС, см	объемная влажность СТС, $W_{об}$, %
14.08.2014–13.08.2015	-1,6	Август 2015	80	44
14.08.2015–13.08.2016	-0,2	Август 2016	109	32
14.08.2016–13.08.2017	-1,6	Август 2017	76	39

геофизических исследований там были закончены мероприятия по инженерной защите: образовавшийся овраг, подходящий вершиной к опоре ЛЭП, был засыпан песком, а поверхность покрыта слоем гидро- и теплоизоляции (полиэтиленовая пленка

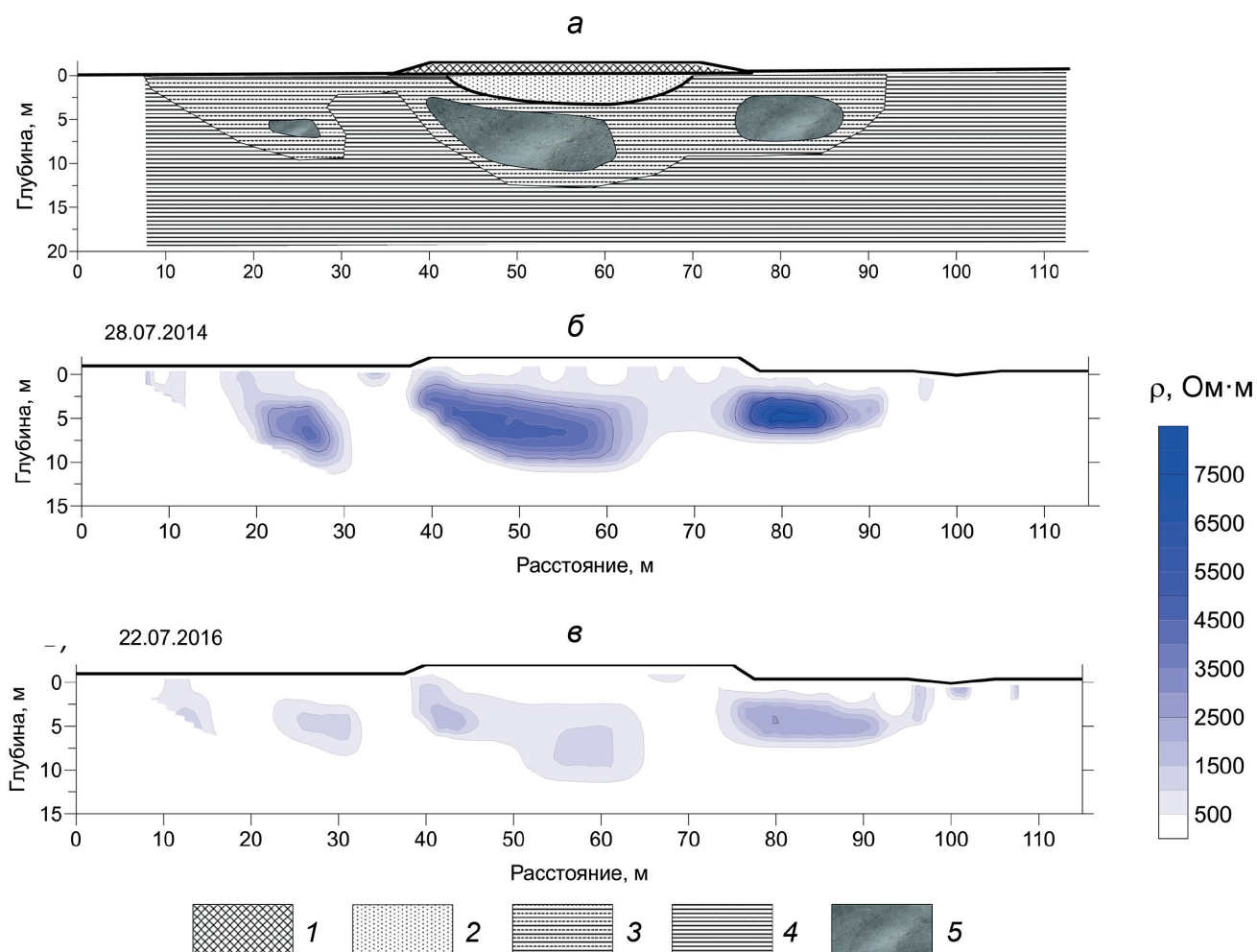


Рис. 5. Геокриологический разрез (а) и геоэлектрические разрезы по данным ЭТ через рекультивированный участок овражной эрозии на Бованенковском ГКМ в 2014 (б) и 2016 (в) годах: 1 — теплоизоляция; 2 — песок; 3 — супесь; 4 — глина; 5 — лед

и пеноплэкс). В пределах участка по сети профилей выполнены исследования методом ЭТ. На геоэлектрическом разрезе по одному из профилей, полученному после рекультивации в 2014 г. (рис. 5), выделяются локальные аномалии высокого УЭС, вызванные пластовыми льдами, по которым развивался овраг. Вмещающие породы представлены мерзлыми супесями и глинами, имеющими низкое УЭС.

Сравнением геоэлектрических разрезов, полученных в 2014 и 2016 гг., установлено, что за два года интенсивность аномалий от пластовых льдов уменьшилась с 5000–10 000 Ом·м до 1000–3000 Ом·м (рис. 5, б, в), что связано с повышением их температуры. Электрометрический мониторинг показал, что, несмотря на инженерные мероприятия, деградация мерзлой толщи продолжается. В будущем протавивание подземных льдов приведет к образованию термокарста и активизации овражной эрозии.

Мониторинг состояния мерзлых грунтов в основании крупного инженерного сооружения (на примере Вилюйской ГЭС). Ряд крупных гидротехнических сооружений (ГТС), например Вилюйская ГЭС (включая Вилюйское водохранилище), снабжающая промышленной электроэнергией Западную Якутию,

возведен и эксплуатируется в криолитозоне. Из-за высокой энерговооруженности такие объекты представляют собой тепловые источники, инициирующие деградацию вечной мерзлоты. Наблюдения за ее состоянием проводятся средствами геофизического мониторинга.

Вилюйская ГЭС возведена в скальном массиве долеритовых траппов мощностью до 200 м с включениями сильнольдистых карбонатных ксенолитов, имеющих проявления на дневной поверхности и общую протяженность вдоль правобережного примыкания около 100 м. На этом участке, начиная с 1996 г., развивается техногенный водонасыщенный талик, коллектором которого служат растепленные карбонатные ксенолиты. Тепловое состояние пород примыкания плотины непрерывно отслеживается на скважинном термометрическом полигоне, включая пробуренные в 2000-х гг. вдоль правобережного примыкания дополнительные геофизические скважины. Многолетняя обходная фильтрация подземных вод стала угрожать фильтрационной устойчивости всей ГЭС, параметры ее русел до сих пор известны только в самом общем виде. Поэтому во избежание пропусков ее русел возникла необходимость вести

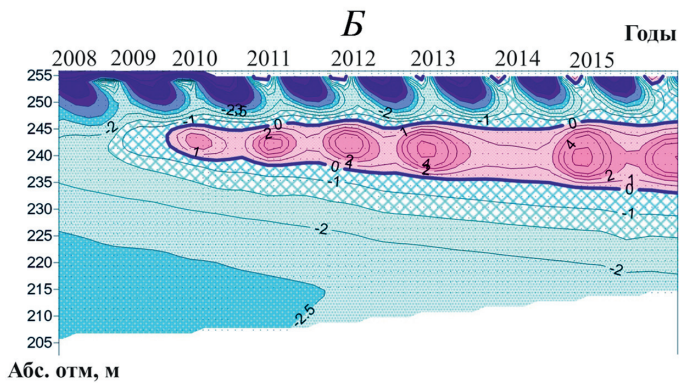
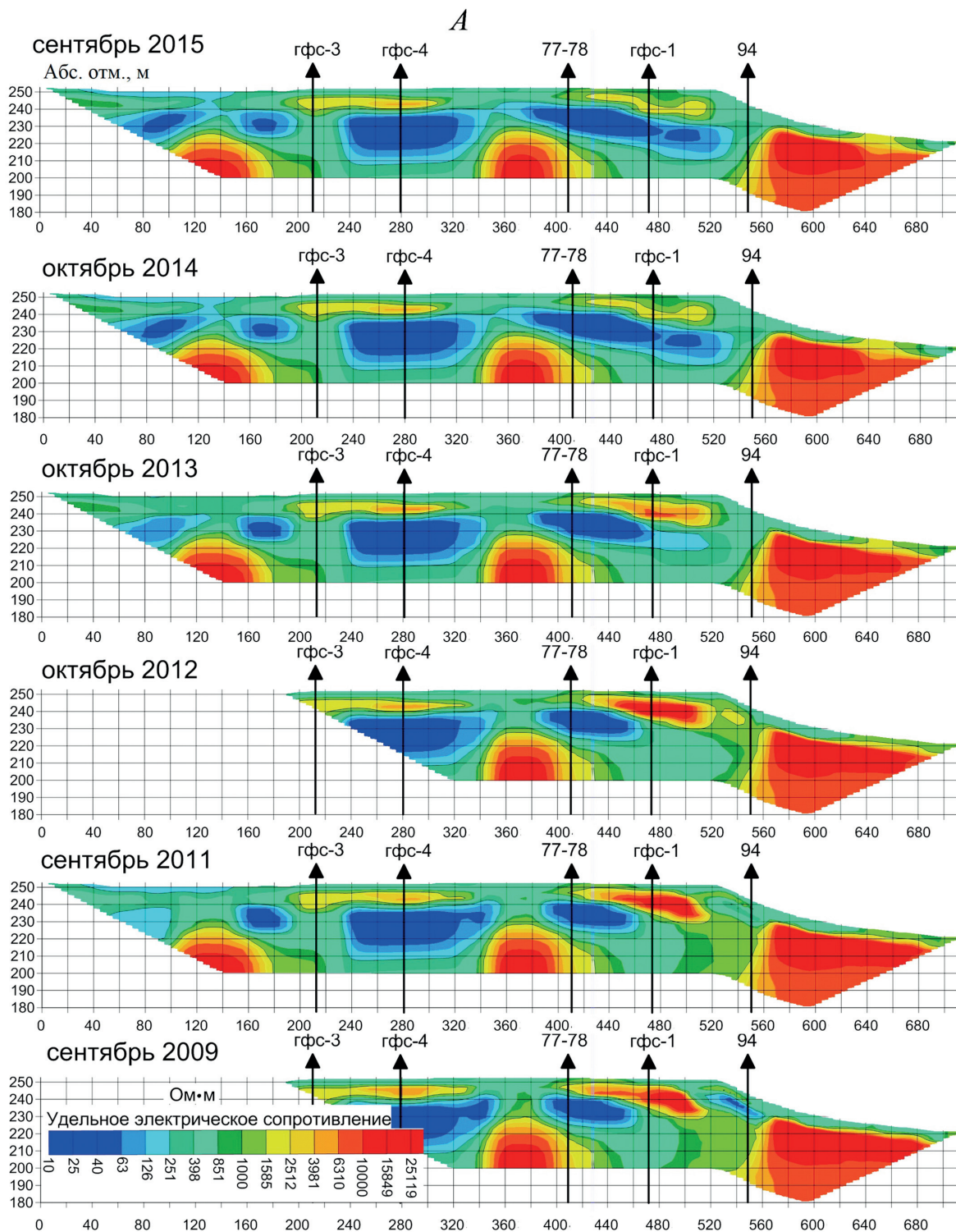


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы (A) и фрагмент температурного разреза (B) (скважина 78) за 2008–2014 гг. при мониторинге состояния береговых примыканий плотины Вилюйской ГЭС

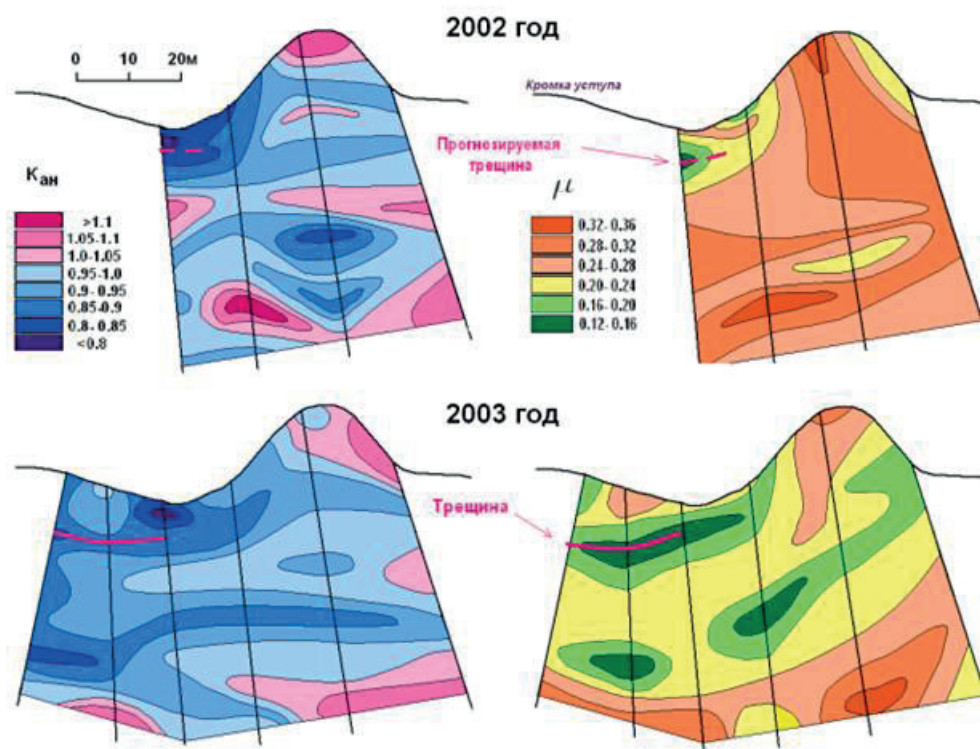


Рис. 7. Распределение значений коэффициента анизотропии продольных волн ($K_{ан}$) и коэффициента Пуассона (μ) грунтового массива в морском береговом уступе (Геокриологический стационар Болванский, Ненецкий автономный округ, устье р. Печора), по [Скворцов и др., 2006]

мониторинг профилированием правобережного примыкания плотины геофизическими методами под контролем температурных измерений на скважинном полигоне.

Результат мониторинга правобережного примыкания плотины методом электротомографии (ЭТ) при его контроле геотермическими мониторингом показан на рис. 6. Слева видна «геоэлектрическая» деградация высокоомной (мерзлой) приповерхностной линзы (красное) в районе скв. ГФС-1 и аналогично видно развитие низкоомной линзы (русло обходной фильтрации подземных вод) в районе скв. 78.

Температурный разрез скв. 78 (рис. 6, справа) показывает развитие талика с 2010 по 2015 г. в диапазоне глубины 230–250 м. Как видно на рис. 6, мощность талика и низкоомной линзы совпадает, т.е. данные геоэлектрического мониторинга подтверждаются результатами температурных наблюдений.

Мониторинг склоновых процессов. На рис. 7 приведен пример использования геофизических методов для мониторинга склоновых процессов на морском берегу в устье р. Печора на геокриологическом стационаре Болванский. Здесь кровля ММП залегает на глубине 1–1,5 м.

По характеру распределения значений коэффициента анизотропии продольных волн и коэффициента Пуассона в 2002 г. установлено пространственное положение ослабленной зоны, характеризующейся аномально низкими значениями этих характеристик, и выполнен прогноз области возможного нарушения сплошности грунтового массива в

5–7 м от кромки берегового уступа. В 2003 г. на этом месте образовалась крупная трещина отседания. Анализ распределения сейсмических характеристик по площади, полученных в 2003 г., показал, что в течение года на исследуемой площадке произошло изменение напряженно-деформированного состояния. Сформировалась новая ослабленная зона на удалении 20–30 м от кромки берегового уступа. Появление трещин в этой зоне было зарегистрировано два года спустя.

Заключение. Мониторинг состояния вечной мерзлоты важен не только для естественных природных условий (фоновый мониторинг), но и для обеспечения устойчивости жилых и промышленных зданий и инженерных сооружений, в том числе инфраструктуры нефтегазовых промыслов в криолитозоне, в составе геотехнического мониторинга (ГТС). При организации государственной системы мониторинга вечной мерзлоты необходимо, кроме термометрии и других исследований, использовать комплекс геофизических методов, способных оценить состояние и свойства горных пород за границами информативности термометрических скважин.

Приведенные примеры мониторинговых геофизических исследований в различных условиях криолитозоны показывают, что геофизическими методами можно успешно решать задачи мониторинга криолитозоны, в том числе на территориях, подвергающихся антропогенному воздействию. В частности, методы сейсморазведки эффективны для контроля положения кровли многолетнемерзлых

пород, оценки изменения их физико-механических свойств при повышении температуры, особенно в засоленных породах, а также в присутствии металлических конструкций, когда возможности электрозвездки ограничены. На существенном различии УЭС талых и мерзлых горных пород основан электрометрический мониторинг состояния грунтов. В крупнодисперсных и незасоленных породах для определения границ и свойств разреза до глубины 10–15 м, в том числе мониторинга положения кровли мерзлоты, влажности СТС, мощности растительного и снежного покрова, рекомендуется применять георадиолокацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.

Воронков О.К., Фролов А.Д. Физические свойства пород при отрицательных температурах // Петрофизика. Т. 3. М.: Недра, 1992. С. 43–65.

Геофизика. Учеб. пособие, электронное издание сетевого распространения / Под ред. В.К. Хмелевского. М.: КДУ, Добросвет, 2018.

Джурик В.И. Прогноз изменения упругих параметров песков при переходе из мерзлого состояния в талое // Геология и геофизика. 1982. № 7. С. 87–95.

Ельцов И.Н., Оленченко В.В., Фаге А.Н. Электромография в Российской Арктике по данным полевых исследований и трехмерного численного моделирования // Neftegaz.RU. 2017. № 2. С. 54–64.

Ермаков А.П., Старовойтов А.В. Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 6. С. 91–97.

Еришов Э.Д. Общая геокриология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 682 с.

Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007.

Кошурников А.В. Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на Арктическом шельфе России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2020. № 3. С. 116–125.

Крылов С.С., Бобров Н.Ю. Применение электромагнитных зондирований для исследования частотной дисперсии электрических свойств мерзлых пород // Криосфера Земли. 2002. Т. 6, № 3. С. 59–68.

Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков и др. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2021. Т. 25, № 6. С. 3–15. DOI 10.15372/KZ20210601.

Мельников В.П., Скворцов А.Г., Малкова Г.В. и др. Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью геофизических методов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. 169–177.

Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.

Оленченко В.В., Кондратьев В.Г. Геофизические исследования в пределах участка деформаций автодороги, построенной на мерзлом основании: Мат-лы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения, Новосибирск, 2017. С. 282–283.

Представленные результаты демонстрируют высокую эффективность геофизического мониторинга в криолитозоне. Очевидна необходимость принятия организационных решений для включения геофизических методов в систему геокриологического мониторинга. Особенно актуально использовать геофизический мониторинг на застроенных и нарушенных территориях, которые характеризуются контрастной пространственно-временной изменчивостью мерзлотных условий, достоверно оценить которую с помощью температурных наблюдений невозможно.

Омельяненко А.В. Научно-методические основы георадиолокации мерзлых горных пород: Автореф. докт. дисс. Якутск, 2001. 359 с.

Садуртдинов М.Р., Малкова Г.В., Скворцов А.Г. и др. Современное состояние островной мерзлоты в пойме реки Печора (Ненецкий автономный округ) по результатам комплексных геокриологических и геофизических исследований // Мат-лы Пятой конференции геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2016 г. Т. 1. Ч. 4. Геофизические исследования в криолитозоне при строительстве. М.: Университетская книга, 2016. С. 340–345.

Селяев В.А., Буддо И.В., Мисюркеева Н.В. и др. Особенности методики исследования многолетнемерзлых пород электромагнитными методами на полуострове Ямал // Мат-лы VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна. М., 2021. С. 297–300.

Скворцов А.Г. Особенности структуры поля упругих колебаний в нелиитифицированных многолетнемерзлых породах // Криосфера Земли. 1997. Т. 1, № 3. С. 66–72.

Скворцов А.Г., Дроздов Д.С., Малкова Г.В. и др. Мониторинг напряженно-деформированного состояния берегового склона на геокриологическом стационаре Болванский” с помощью сейсмозвездки // Криосфера Земли. 2006. Т. 10, № 2. С. 46–55.

Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли. 2014. Т. 18, № 2. С. 83–90.

Скворцов А.Г., Царев А.М., Садуртдинов М.Р. Методические особенности изучения сейсмогеокриологического разреза // Криосфера Земли. 2011. Т. 15, № 4. С. 110–113.

Судакова М.С., Владов М.Л. Результаты экспериментального исследования акустических свойств водонасыщенного песка в интервале температуры от –20 до +20 °С. Часть 2 // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2020. № 2. С. 89–98.

Судакова М.С., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. и др. Возможности георадиолокации для исследования заболоченных торфяников в криолитозоне // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 7. С. 1004–1013.

Фролов А. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов, Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515с.

Pavoni M., Sirch F., Boaga J. Electrical and electromagnetic geophysical prospecting for the monitoring of rock glaciers in the Dolomites, Northeast Italy // Sensors. 2021. Vol. 21. № 1294. 17 p.

Sudakova M., Sadurtdinov M.; Skvortsov A.; Tsarev A., Malkova G., Molokitina N., Romanovsky V. Using Ground Penetrating Radar for Permafrost Monitoring from 2015–2017 at CALM Sites in the Pechora River Delta // *Remote Sens.* 2021. 13. 3271. <https://doi.org/10.3390/rs13163271>

Topp G.C., Davis J.L. & Annan A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines // *Water Resource Research.* 1980. Vol. 16. P. 574–582.

https://www.mnr.gov.ru/press/news/sozdanie_sistemy_monitoringa_vechnoy_merzloty_plany_nauchnykh_ekspeditsiy_ledostoykoj_platformy_itog/ (дата обращения: 16.08.2022)

<https://www.arcticdata.io/catalog/portals/CALM/About> (дата обращения: 16.08.2022)

Статья поступила в редакцию 06.06.2022,
одобрена после рецензирования 08.06.2022,
принята к публикации 26.01.2023