

ШИРОТНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ СТРОЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Е.В. Агеенков^{1,*}, В.В. Потапов¹, Е.Ю. Антонов¹, А.Н. Шеин², В.В. Оленченко¹

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия

² ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики, 119991, Салехард, ул. Республики, 20, Россия

*Автор для контакта; e-mail: AageenkovEV@ipgg.sbras.ru

Для определения современного состояния многолетнемерзлой толщи в условиях широтной зональности Ямало-Ненецкого автономного округа и оценки ее трансформации в связи с происходящими климатическими изменениями выполнены электромагнитные зондирования становлением поля в ближней зоне на десяти площадках по субмеридиональному профилю от Сибирско-Увальского поднятия на юге до Пур-Тазовского междуречья на севере с шагом около 50 км. Проведена интерпретация геоэлектрических моделей и сравнение с построениями структуры многолетнемерзлой толщи пород по данным бурения, предоставленным Научным центром изучения Арктики из своего архива. В результате интерпретации геоэлектрических разрезов выделены современная и реликтовая многолетнемерзлые толщи, межмерзлотный талик. Установлено, что современная подошва многолетнемерзлых пород залегает на глубинах от 50 до 130 м. Сопоставление результатов современной съемки с архивными опорными геокриологическими разрезами не показало существенных различий в положении геокриологических границ. Хотя надо отметить значительное расстояние на профиле между площадками исследования, а зачастую, сильную удаленность мест расположения скважин с опорными разрезами от этих площадок. Наибольшие различия современных и архивных данных наблюдались в северной части профиля, что, вероятно, связано с проявлением в данных зондирования становлением поля увеличения засоленности пород.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, засоленные породы, реликтовая мерзлая толща, электромагнитные зондирования, Ямало-Ненецкий автономный округ.

Ссылка для цитирования: Агеенков Е.В., Потапов В.В., Антонов Е.Ю., Шеин А.Н., Оленченко В.В. Широтная зональность строения многолетнемерзлой толщи Ямало-Ненецкого автономного округа по данным электромагнитных зондирований // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 5, с. 60–70. DOI: 10.15372/KZ20240505. EDN: DGDOHM.

LATITUDINAL ZONATION OF PERMAFROST IN THE YAMALO-NENETS AUTONOMOUS OKRUG ACCORDING TO TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDING DATA

Е.В. Агеенков^{1,*}, В.В. Потапов¹, Е.Ю. Антонов¹, А.Н. Шеин², В.В. Оленченко¹

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Akad. Koptyuga ave. 3, Novosibirsk, 630090 Russia

² Arctic Research Center, Republic St. 20, Salekhard, 119991 Russia

*Corresponding author; e-mail: AageenkovEV@ipgg.sbras.ru

To determine the current state of the permafrost in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug and assess its transformation in connection with modern climate changes, transient electromagnetic (TEM) sounding was performed at ten sites along the submeridional profile from the Siberian Uvaly Hills in the south to the Pur-Taz Lowland in the north with a step of about 50 km. An interpretation of geoelectric models was carried out and the results of drilling surveys of permafrost were compared with those provided by the Arctic Research Center from its archive. As a result of the interpretation of geoelectric sections, modern and relict permafrost strata and closed taliks were identified. It was found that the modern base of permafrost lies at depths from 50 to 130 m. A comparison of the results of modern TEM surveys with archival reference geocryological sections did not show significant differences in the position of geocryological boundaries. However, it is necessary to note the significant distance between the TEM sites, as well as, often, considerable distances between them and reference boreholes. The greatest differences between the modern and archival data are noted in the northern part of the profile, which is probably due to the increased salinity of the rocks at the TEM survey sites.

Keywords: permafrost, saline rocks, relict frozen strata, transient electromagnetic soundings, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug.

ВВЕДЕНИЕ

Широтная зональность многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты глубоко изучена и описана в фундаментальных работах конца прошлого столетия, показаны региональные изменения мощности мерзлой толщи, ее структуры и положения подошвы [Карта..., 1984; Трофимов и др., 1987; Геокриология..., 1989]. Тем не менее вследствие длительной интенсивной антропогенной нагрузки, а также глобальных климатических изменений происходят трансформации границ многолетнемерзлых пород (ММП) [Баду, 2014], увеличение глубины сезонного оттаивания, формирование техногенных таликов и другие экзогенные процессы. Поэтому исследования любыми доступными методами, в том числе геофизическими, направленные на изучение современного состояния мерзлой толщи, востребованы и актуальны.

По результатам исследований 1960–1980-х годов на всех широтах криолитозоны Западно-Сибирской плиты отчетливо выражено закономерное увеличение глубины залегания подошвы ММП и их мощности от западных, Зауральских районов к восточным, Приенисейским [Геокриология..., 1989]. Наибольший градиент такого изменения наблюдается при движении от крайне юго-западной части криолитозоны (Северо-Сосьвинско-Кондинско-Обское междуречье) к северо-восточной части плиты (Большехетско-Танамско-Енисейское междуречье). В соответствии со схемой “Пространственное положение нижней границы многолетнемерзлых толщ в пределах Западно-Сибирской плиты” [Геокриология..., 1989] большая часть района исследований расположена в области с нижней границей многолетнемерзлой толщи (ММТ) [Баду, 2014] на глубине от 100 до 300 м на юге и в центре и от 300 до 450 м на севере. Учитывая погружение этой границы с запада на восток, можно предположить, что глубина подошвы ММП для северного участка профиля будет незначительно превышать 300 м.

Электроразведочные методы для изучения ММП стали применяться давно. Первоначально использовались измерения на постоянном токе [Якупов, 1966; Трофимов, 1977; Трофимов и др., 1987; Геокриология..., 1989], а позднее на переменном [Крылов, Бобров, 2002; Стогний, 2003; Агеев, 2012; Захаренко и др., 2012]. Такие исследования продемонстрировали особенность геоэлектрического строения Западной Сибири – повсеместное присутствие в разрезе слоев с очень низким удельным электрическим сопротивлением (УЭС), достигающим первых десятков, а в некоторых случаях – нескольких единиц ом на метр. Так, например, методом вертикального электрического зондирования в пределах различных по возрасту морских террас и равнин Ямала и севера Гыданского полуострова выделены слои с УЭС от 5 до

30 Ом·м [Геокриология..., 1989]. При составлении прогнозной карты геоэлектрических разрезов масштаба 1:2 500 000 было установлено, что горизонты с низким электрическим сопротивлением 30–200 Ом·м являются не аномальными участками, а имеют широкое площадное распространение в зоне криолитогенеза [Захаренко и др., 2012]. Понижение УЭС связывают с засоленностью мерзлых пород. Засоленные мерзлые отложения, отличаясь повышенным содержанием незамерзшей поровой воды, представляют собой сложную криогенную систему криолитозоны, занимая промежуточное положение между мерзлыми и немерзлыми породами [Там же].

Значительное распространение засоленных пород объясняется геологическим развитием территории [Геокриология..., 1989]. Самая северная часть Западно-Сибирской плиты, включающая полуострова Ямал, Тазовский и Гыданский, к началу промерзания только что вышла из-под уровня моря. Не пройдя инфильтрационного этапа гидрогеологического цикла, слабоводопроницаемые, преимущественно глинистые породы средне- и верхнечетвертичного возраста начали активно промерзать. Верхняя зона пресных подземных вод не успела сформироваться, о чем свидетельствует засоленность грунтов до глубин 200 м и более вплоть до 69–68° с.ш. В работе [Захаренко и др., 2012] указывается, что минерализация охватывает криогенную толщу на всю ее мощность до 300 м и более и имеет различное геологическое происхождение.

По данным электромагнитных зондирований становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) в центральной части п-ова Гыданский в районе станции Парисенто, расположенного на широте 70.1° с.ш., верхняя часть разреза до глубины 50–75 м представлена высокомицелиальными мерзлыми породами с включением пластовых льдов [Панькова и др., 2020], а понижение УЭС вниз по разрезу до 7–14 Ом·м связано с морскими засоленными суглинками. Предполагаемая по геофизическим данным мощность ММП здесь достигает 210–300 м.

В Надым-Пуровском междуречье Западно-Сибирского бассейна (юг п-ова Гыданский) в северной части области прерывистой и реликтовой мерзлой толщи по данным ЗСБ выделена реликтовая ММТ, подошва которой залегает на глубине 370 м [Misurkeeva et al., 2022]. Результаты интерпретации согласуются с данными каротажа сопротивления и температуры пород. Стоит отметить, что значения УЭС толщи, которую авторы связывают с реликтовыми ММП, изменяются в пределах от 20 до 40 Ом·м.

Анализ литературы показал положительные примеры изучения ММП методами электроразведки. Однако мерзлые породы не представляются

однородной высокомной толщой, УЭС их может варьировать в широких пределах. Основные факторы, влияющие на повышение УЭС, – понижение температуры, увеличение льдистости ММП. На-против, повышение температуры, увеличение засоленности снижают УЭС мерзлых пород.

Целью исследований являлись определение положения подошвы ММП вдоль субмеридионального профиля от южной границы до зоны сплошного распространения мерзлых пород и оценка трансформации мерзлой толщи под влиянием современных климатических изменений.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ

Для прослеживания изменений в строении ММТ в широтном направлении были выполнены

электромагнитные зондирования методом ЗСБ по субмеридиональному профилю от г. Ноябрьск на юге до пос. Тазовский на севере (рис. 1, табл. 1).

Полевые измерения проведены на 10 площадках, расположенных с шагом, близким к равномерному – порядка 50 км. Измерения выполнены установкой с генераторной петлей 100 × 100 м и тремя одновитковыми измерительными петлями размером 20 × 20 м. Две из них расположены с разносом 100 м относительно центра источника, одна – соосно с генераторной петлей (с разносом 0 м) (рис. 2). Такая конфигурация генераторных и измерительных петель выбрана исходя из следующих соображений.

При измерениях методом ЗСБ над мерзлыми породами помимо электромагнитного (ЭМ) становления поля возникает индукционно-вызван-

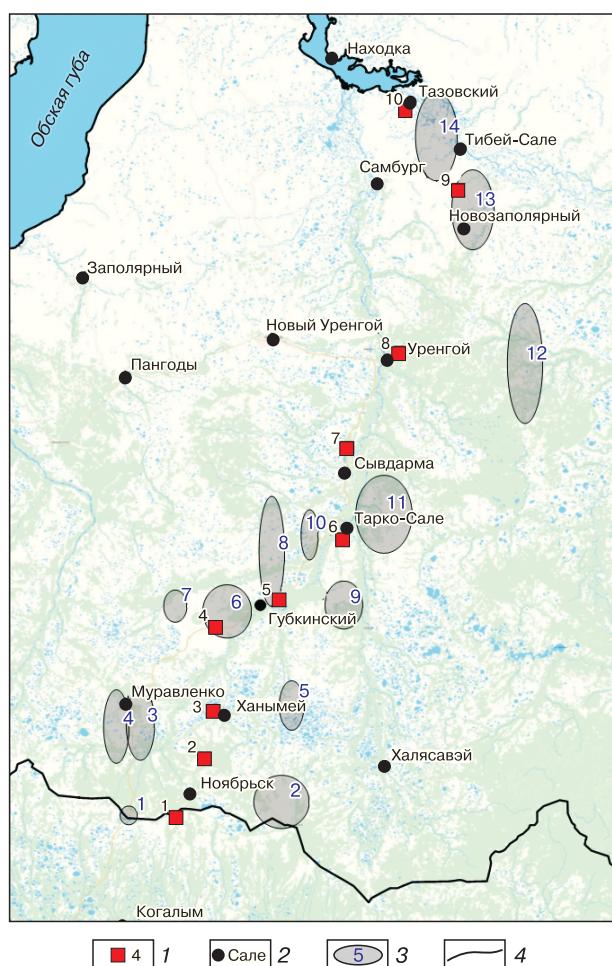


Рис. 1. Схема расположения площадок субмеридионального профиля от г. Ноябрьска до пос. Тазовский и объектов априорной информации.

1 – номер площадки ЗСБ; 2 – населенный пункт; 3 – номер объекта априорной информации; 4 – административная граница ЯНАО.

Таблица 1. Площадки субмеридионального профиля от г. Ноябрьска до пос. Тазовский и объекты априорной информации

Номер площадки	Расположение участка исследований (термометрический пункт)	Геокриологический район, геокриологическая область	Номер объекта с априорным геокриологическим разрезом (удаленность от площадки)
1	Район г. Ноябрьска (НОЯ-1/22)	Центрально-Сибирско-Увальский, Надым-Пуровская	1 (45 км к С), 2 (65 км к В)
2	Между г. Ноябрьском и пос. Ханымей	Надым-Пуровский, Надым-Пуровская	3 (46 км к С-3), 4 (64 км к С-3), 2 (50 км к Ю-В)
3	Район пос. Ханымей (ХНМ-1/22)	Надым-Пуровский, Надым-Пуровская	3 (48 км к С), 4 (67 км к С), 5 (64 км к С-В)
4	Между пос. Ханымей и г. Губкинский	Губкинский, Надым-Пуровская	6 (18 км к С), 7 (36 км к С-3), 8 (44 км к С-В)
5	Район г. Губкинский (ГУБ-1/22)	Губкинский, Надым-Пуровская	8 (10 км к С-3), 9 (25 км к В)
6	Район г. Тарко-Сале (TPC-1/22)	Пуровский, Надым-Пуровская	10 (30 км к З), 11 (32 км к С-В)
7	Междуп. г. Тарко-Сале и пгт. Уренгой	Пуровский, Надым-Пуровская	
8	Район пгт. Уренгой (УРГ-1/22)	Пур-Тазовский, Надым-Пуровская	12 (83 км к В)
9	Район пос. Новозаполярный	Тазовский, Тазовская	13 (вблизи)
10	Район пос. Тазовский (C10-2022)	Восточно-тазовский, Тазовская	14 (вблизи)

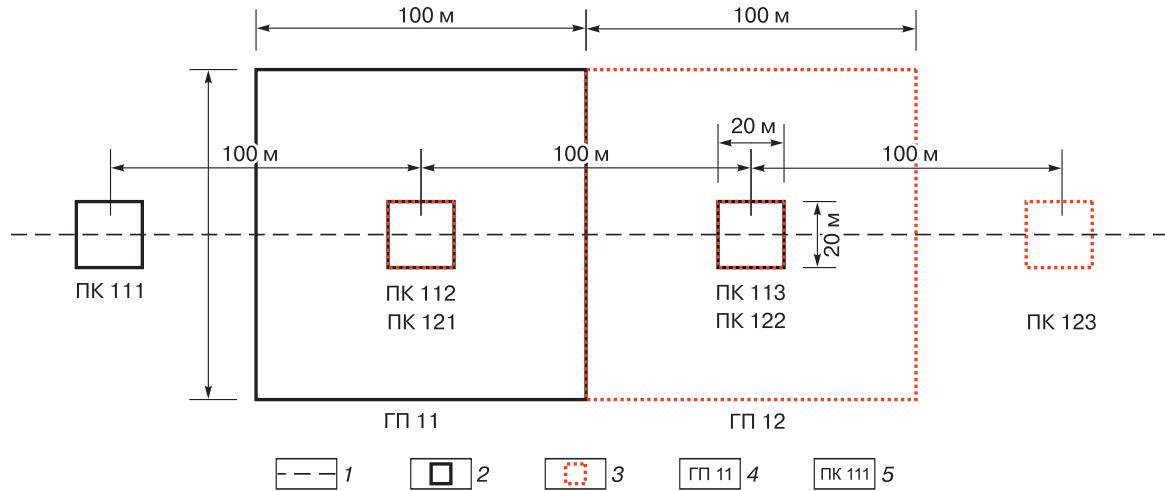


Рис. 2. Схема расположения генераторных и измерительных петель на площадке работ методом ЗСБ.

1 – направление профиля; 2 – расположение первой генераторной петли и ее измерительных петель; 3 – расположение второй генераторной петли и ее измерительных петель; 4 – номер генераторной петли; 5 – номер измерительной петли (пикета).

ная поляризация (ВПИ), также сопровождающаяся ЭМ-сигналом. Измерителями регистрируется специфический переходный процесс, связанный с тем и другим ЭМ явлением. Из теории и практики применения метода ЗСБ [Сидоров, 1985; Стогний, Коротков, 2010; Кожевников, 2012; Каменецкий и др., 2014] известно, что в случае, когда измерительная петля соосна генераторной, сигнал ВПИ наибольшим образом проявляется в измерениях. Это в некоторых случаях осложняет решение обратной задачи при количественной интерпретации. В случае же, когда измерительная петля удалена от центра генераторной, проявление сигнала ВПИ ослабевает. Поэтому для определения проводящих свойств разреза в присутствии сигнала поляризации часто используют измерения на некотором удалении от центра источника.

Измерения сигналов переходных процессов выполнены электrorазведочной станцией Fast-Snap [Шарлов и др., 2010; FastSnap..., 2017].

Подбор одномерных геоэлектрических моделей в каждой точке зондирования проводился с помощью программы ТЕМ-IP [Антонов и др., 2014]. Решение обратной задачи электромагнитных зондирований выполнялось с учетом ВПИ верхней части разреза. Учет ВПИ при решении прямой задачи осуществляется путем использования комплексной удельной электропроводности, зависящей от частоты. Наиболее известным и часто применяемым представлением частотной характеристики вызванной поляризации геологических сред является формула Коул–Коула [Cole K.,

Cole R., 1941]. Для комплексной удельной электропроводности [Lee, 1981] формула имеет вид

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + (i\omega\tau)^C}{1 + (1 - \eta)(i\omega\tau)^C},$$

где i – мнимая единица ($\sqrt{-1}$); ω – угловая частота, Гц; σ_0 – удельная электропроводность на постоянном токе, См/м; η – поляризуемость ($0 \leq \eta \leq 1$); τ – время релаксации, с; C – показатель степени ($0 < C \leq 1$).

Анализ первичных данных позволил для инверсии сделать выбор общего временного интервала переходного процесса – от 1 мкс до 5 мс. Проявления ВПИ отмечались на всех площадках, за исключением второй. Погрешность аппроксимации экспериментальной кривой теоретической зависимостью составляла в среднем от 2 до 6 %.

На рис. 3 приведены типичные кривые кажущегося сопротивления соосных измерений для площадок № 1, 2, 5 и 10. В табл. 2 даны параметры геоэлектрических моделей, аппроксимирующие эти кривые с учетом ВПИ (площадки № 1, 5, 10) и без учета ВПИ (площадка № 2). Помимо поляризуемости, значения которой приведены в табл. 2, поляризационный процесс характеризуется временем релаксации и показателем степени. Время релаксации составляло от единиц до сотен микросекунд. Показатель степени принимал значение единица. Такие величины τ и C свойственны для поляризационных процессов, протекающих в мерзлых породах [Кожевников, 2012].

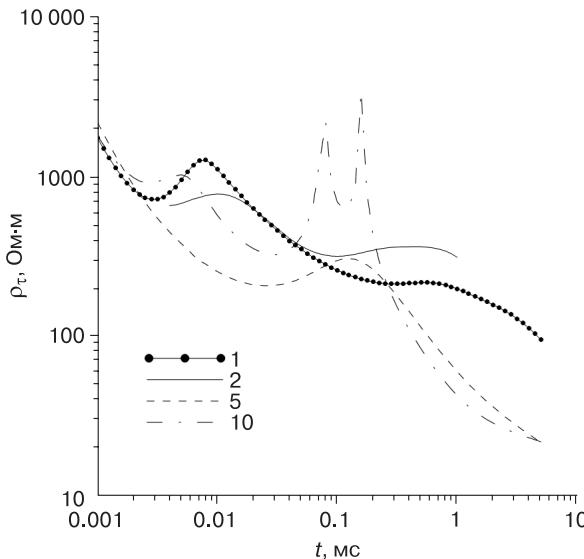


Рис. 3. Типичные кривые кажущегося сопротивления ρ_t от времени t соосных измерений для площадок № 1, 2, 5, 10.

Параметры геоэлектрического разреза находились путем минимизации функционала невязки, характеризующего среднеквадратичное отклонение экспериментальных и модельных данных. Целевая функция задавалась в общем виде

$$\Phi(\mathbf{P}, t) = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{f^e(t_i) - f^t(\mathbf{P}, t_i)}{\delta(t_i) f^e(t_i)} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где \mathbf{P} – вектор из пространства модельных параметров; $\{t_i, i = 1, \dots, N\}$ – времена измерения переходной характеристики; $f^e(t)$ – экспериментальные данные; $f^t(\mathbf{P}, t)$ – теоретический расчетный сигнал; δ – относительная ошибка измерений.

Минимизация выполняется путем корректировки параметров модели \mathbf{P} . Наиболее ответственный момент – выбор начального приближения, начальное значение набора параметров $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0$,

Таблица 2.

Параметры геоэлектрических моделей, описывающие типичные кривые кажущегося сопротивления

Номер слоя	Площадка 1			Площадка 2			Площадка 5			Площадка 10		
	ρ	h	η	ρ	h	η	ρ	h	η	ρ	h	η
1	244	15	0.3	160	11	0	131	12	0.057	2726	27	0.64
2	474	15	0	2941	65	0	330	7	0.17	192	40	0.32
3	3360	45	0	121	61	0	139	37	0	279	33	0
4	105	111	0	1947	100	0	4602	47	0	2984	34	0
5	4013	135	0	1699	103	0	3403	48	0	6	67	0
6	56	–	0	123	–	0	7	1	0	29	–	0

Примечание. Площадки № 1, 5, 10 – с индукционно-вызванной поляризацией; площадка № 2 – без индукционно-вызванной поляризации. ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м; h – толщина, м; η – поляризуемость, д. ед.

осуществляется на основе имеющейся геологогеофизической информации. При решении обратной задачи использовался итерационный метод прямого поиска – модифицированный метод Нелдерса–Мида (или метод “деформируемого многогранника”) [Nelder, Mead, 1965; Gill et al., 1981].

Полученные геоэлектрические модели и разрезы сопоставлялись с априорными данными о криогенном и стратиграфическом строении разрезов по скважинам, пробуренным до глубины 500 м на некоторых месторождениях в пределах Надым–Пуровской и Тазовской геокриологических областей. На этих опорных геокриологических разрезах были выделены криогенные состояния пород [Бады, 2014]: мерзлые, слоисто-мерзлые, морозные, охлажденные, слоисто-мерзлые и охлажденные, морозные и охлажденные. Однако априорных сведений об УЭС этих геокриологических разностей не имелось, и авторы могли лишь сопоставить положение геокриологических границ на опорных разрезах и на геоэлектрических моделях. В некоторых случаях опорные скважины были расположены на удалении от 10 до 80 км от площадок электромагнитных зондирований (см. табл. 1), что снижало ценность априорной информации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНВЕРСИИ И ОБСУЖДЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ

В результате инверсии в рамках одномерной поляризующейся модели отдельных измерений на площадке были составлены геоэлектрические разрезы УЭС каждой из них.

На геоэлектрических моделях по значениям УЭС наиболее уверенно выделяется слой современной ММТ. Реликтовая ММТ на большинстве моделей выделяется только по сопоставлению со строением опорных геокриологических разрезов и по результатам опубликованных электроразведочных исследований криолитозоны [Misyurkeeva et al., 2022].

В основании разрезов присутствует проводящий слой – талые породы, подошвой ММП отделенные от второго слоя ММП – реликтовой мерз-

лоты. Слой реликтовых ММП может перекрываться проводящими породами межмерзлотного талика, который, в свою очередь, перекрыт первым слоем ММП – высокомонной современной мерзлой толщой. Над слоем современной мерзлоты по снижению УЭС зачастую выделяется сезонноталый слой. Геоэлектрические разрезы на площадках позволяют оценить степень горизонтальной слоистости геологической среды в пределах установки. Отмечается проявление трехмерного строения геологического разреза на площадке № 8, связанного с присутствием там озера.

На каждой площадке была выбрана геоэлектрическая модель, полученная для одного из соосных измерений, отражающая общее строение разреза для площадки – так называемая генерализованная геоэлектрическая модель. На основе этих моделей был построен геоэлектрический разрез для всего профиля, на котором выделяются особенности геоэлектрических характеристик каждой площадки (рис. 4).

Основание геоэлектрических моделей на площадках № 1 и 2 более высокомонное, чем на осталь-

ных. Площадка № 1 находится в пределах структурно-тектонической и орографической зоны Сибирские увалы, площадка № 2 – на ее границе с Таз-Пурровской низменностью. Причина повышения УЭС, возможно, связана с пониженнной минерализацией подземных вод на этих глубинах по сравнению с центральной и северной частями профиля.

Положение кровли более проводящих пород в основании геоэлектрических моделей хорошо согласуется с подошвой ММП по данным опорных разрезов для площадок № 1–7.

На площадке № 8 вблизи пос. Уренгой, по данным ЗСБ, опорный проводящий горизонт выделяется с глубины 80–120 м, в то время как на опорном геокриологическом разрезе нижняя граница ММП установлена на глубине 325 м. Предположительно, такое несоответствие объясняется тем, что опорный разрез значительно удален от площадки и находится в 60 км к востоку (см. рис. 1), а в пределах исследуемой площадки, вероятно, на глубине присутствуют высокоминерализованные поровые воды.

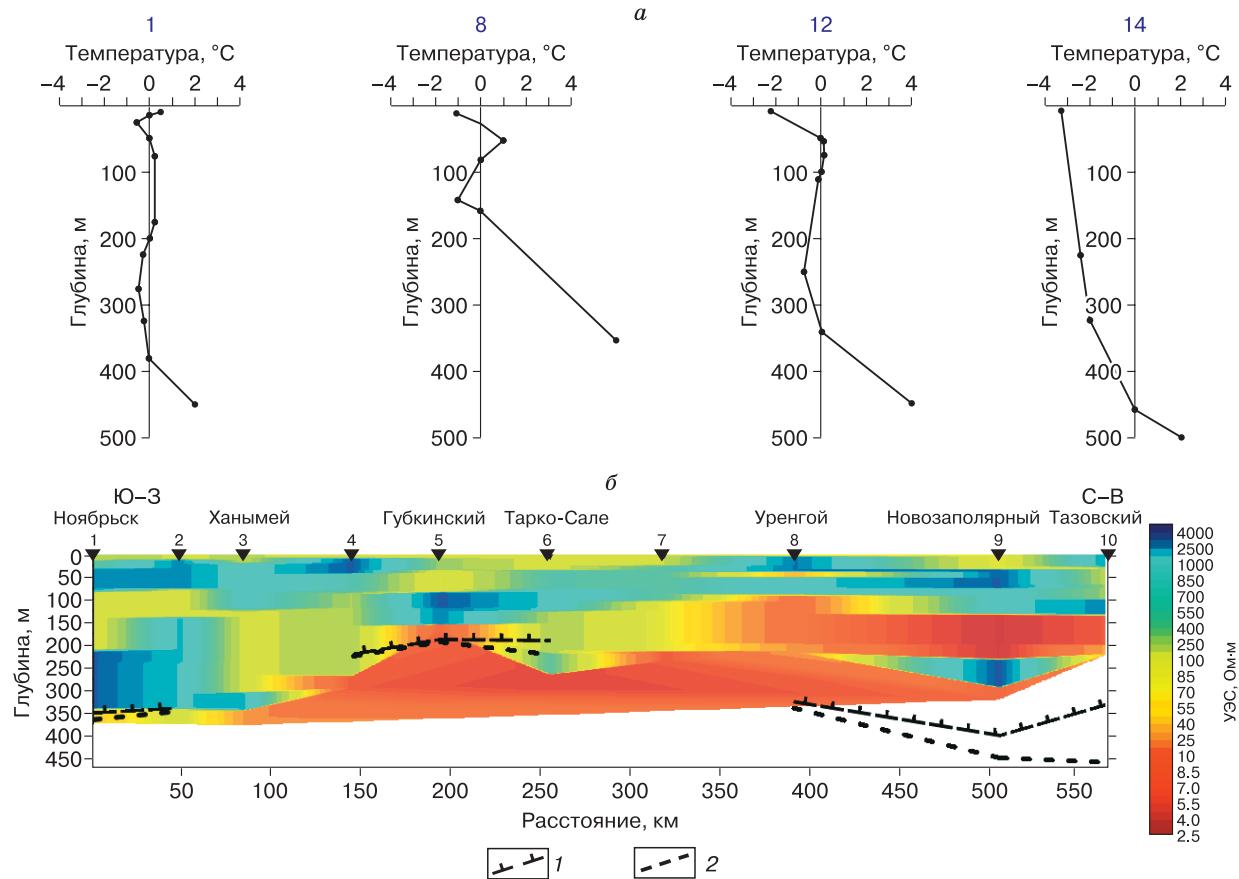


Рис. 4. Термограммы для опорных геокриологических разрезов (архивные материалы) с номерами объектов априорной информации (а) и геоэлектрический разрез по профилю г. Ноябрьск – пос. Тазовский (б).

1 – подошва ММП по архивным данным; 2 – подошва криолитозоны по архивным данным.

На площадке № 9 условно выделена подошва ММП, однако ее положение плохо согласуется с опорным разрезом, полученным на объекте № 13 (см. рис. 1). Здесь, по данным бурения в разрезе, отсутствует межмерзлотный талик, а в геоэлектрических моделях площадки № 9, в диапазоне глубин от 120–130 до 240–280 м, выделяется хорошо проводящий слой с УЭС 3–4 Ом·м, что, по предположениям авторов, связано с проявлением криогалинных вод.

На геоэлектрическом разрезе площадки № 10 в районе пос. Тазовский также присутствуют низкоомные слои с глубины 110–130 м, кровля которых залегает значительно выше подмерзлотной зоны объекта № 14 (см. рис. 1). Слои с УЭС 5–11 Ом·м, вероятнее всего, связаны с проявлением высокоминерализованных вод, а горизонты с УЭС 20–40 Ом·м представлены засоленными мерзлыми породами и слоем реликтовых ММП. Хотя эти криогенные разности не отмечаются в описании разреза на объекте № 14, геоэлектрические модели на площадках № 8–10 хорошо согласуются с опубликованными результатами измерений методом ЗСБ, выполненных на п-ове Гыданский [Misurkeeva et al., 2022], где показано присутствие межмерзлотного талика с УЭС 8–20 Ом·м с кровлей на глубинах от 60 до 100 м, а реликтовые ММП выделяются по значениям УЭС от 20 до 40 Ом·м. Кроме того, еще в более ранней публикации Ж.М. Белорусовой [1963] описана скважина глубиной 538 м, пробуренная непосредственно в пос. Тазовский. По описанию из этого источника, многолетнемерзлые породы в скважине залегают от подошвы сезонноталого слоя до глубины 240 м, ниже вскрыт межмерзлотный талик мощностью 80 м, а на глубинах с 320 до 399 м вновь встречен мерзлый горизонт.

На геоэлектрических моделях площадок № 1–3 необходимо отметить повышенные значения УЭС слоев, которые связаны с реликтовой мерзлотой – до 4500 Ом·м. Далее, по направлению на север, УЭС слоев, интерпретируемых реликтовыми ММП, значительно снижается до 100–200 Ом·м и менее. Исключения составляют модели для площадок № 5 и 9, здесь уровень УЭС слоев реликтовой мерзлоты высок (3000–4500 Ом·м).

Для площадок № 1–7 строение разрезов хорошо описывается горизонтально-слоистой моделью. Для площадок № 8–10 строение толщи, расположенной выше проводящего основания, отличается от одномерного. Это выражается в значительных изменениях глубины границ некоторых слоев и существенных изменениях значений УЭС для геоэлектрических моделей отдельных измерений на площадке. Так, например, для площадки № 8 глубина кровли проводящего основания изменяется от 150 до 220 м, а мощность вышележащего слоя – от 30 до 110 м. Возможно, бо-

лее адекватное описание геологической среды в этих местах могло бы быть получено в рамках двух- или трехмерных моделей.

Для каждой геоэлектрической модели была сделана оценка суммарной проводимости (S , См) по формуле

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{h_i}{\rho_i},$$

где h – мощность слоя, м; ρ – удельное электрическое сопротивление слоя, Ом·м; i – номер слоя геоэлектрической модели; N – количество слоев слоистой модели. Чтобы учесть проводимость основания, мощность последнего слоя взята равной 100 м, хотя при расчете прямой задачи она считалась бесконечной. Такая оценочная величина позволяет районировать протяженный профиль по проводимости изученной части разреза.

По усредненным значениям S для каждой площадки выделяется несколько уровней. Так, на площадках № 1 и 2 значения суммарной проводимости самые низкие – менее 5 См. Далее на север на площадках № 3–5 величина S возрастает до 15 См, а на площадках № 6 и 7 достигает 20 См. На площадках № 8 и 10 проводимость разреза уменьшается примерно до 10 См. На общем фоне выделяется площадка № 9, здесь суммарная проводимость аномально возрастает до 45 См. Последнее связано с присутствием сильно проводящего слоя с УЭС 3–4 Ом·м, кровля которого расположена на глубине примерно 120 м, подошва – ниже глубины 240 м. Вероятно, этот слой связан с таликовой зоной, насыщенной высокоминерализованными водами.

В результате обработки и анализа данных со всех площадок был построен интерпретационный разрез (рис. 5), на котором показана современная многолетнемерзлая толща, с высокими УЭС порядка 1000 Ом·м и более, и реликтовая ММТ, выделенная по УЭС 30–50 Ом·м. Кровля современных ММП закономерно погружается с севера на юг в интервале глубин от первых метров до 15 м.

Предполагаемая подошва реликтовой ММП в районе г. Ноябрьска и пос. Ханымей выделяется на глубине около 350 м, однако поднимается до 200–250 м в средней части профиля, в пределах Надым-Пуровского междуречья. Одной из причин поднятия подошвы ММП может быть влияние газоносных структур [Баду, 2014], которые пересекают профиль в районе Губкинского: для площадки № 4 – Комсомольское месторождение (объект № 6), для площадки № 5 – Губкинское месторождение (объект № 8). Возможно, что и реликтовые подрусловые талики также могут влиять на положение подошвы ММП. Площадка № 6, на которой подошва ММП определена на глубине 260 м, расположена на правом берегу р. Пякупур в междуречье Пякупур–Айваседапур. В границах

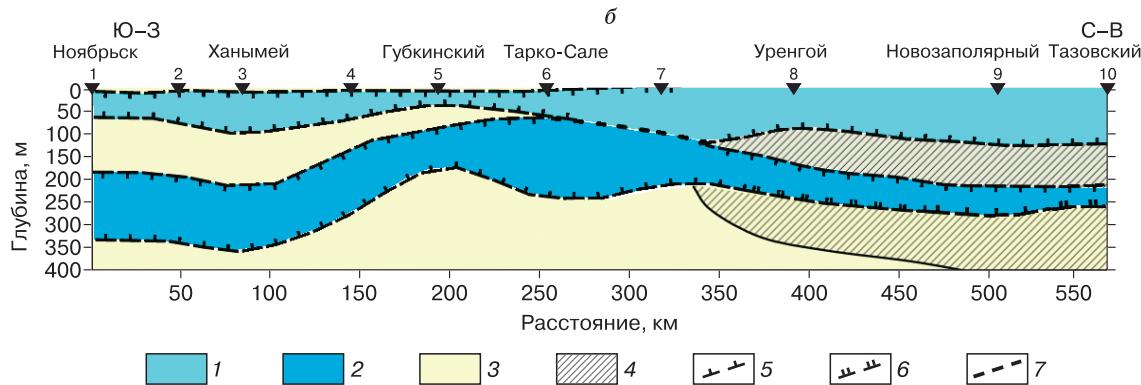


Рис. 5. Общий интерпретационный разрез результатов ЗСБ по профилю г. Ноябрьск – пос. Тазовский.

1 – современные ММП; 2 – реликтовые ММП; 3 – талые породы; 4 – охлажденные породы; 5 – уверенная граница ММП; 6 – неуверенная граница ММП; 7 – предполагаемая граница реликтовых и современных ММП.

Пур-Тазовского междууречья подошва реликтовых ММП погружается до глубины около 300 м.

На геоэлектрических моделях большинства площадок удалось выделить подошву реликтовых ММП, исключение составили площадки № 8 и 10.

На рис. 6 показана глубина подошвы ММП как среднее значение по шести геоэлектрическим моделям на площадке. Горизонтальными отрезками показаны максимальная и минимальная глубины подошвы ММП для каждой площадки. На площадках № 8 и 10 выделены кровля и подошва проводящего горизонта, который можно связать с породами, насыщенными высокоминерализованными водами. Средняя глубина кровли и подошвы межмерзлотного талика, выделенного на геоэлектрических моделях, их максимальная и минимальная глубины для каждой площадки также показаны на рис. 6. На этом же рисунке приведены усредненные глубины подошвы ММП и подошвы криолитозоны, полученные по априорным данным в окрестностях площадок. Следует отметить, что опорные разрезы располагались на различном удалении от мест измерений. Так, от площадки № 8 ближайший объект удален на 83 км к востоку, для площадки № 3 – на 48 км к западу, для площадки № 2 – на 46 км к северо-западу, для площадки № 1 – на 45 км к западу, для площадки № 7 – на 40 км к югу (см. рис. 1).

Положение подошвы ММП по инверсии измерений ЗСБ в южной и центральной частях профиля (площадки № 1–7) в целом соответствует опорным геокриологическим разрезам. В северной части профиля (площадки № 8–10) подошва ММП на опорных разрезах залегает на глубине около 350 м, в то время как по результатам исследований авторов – на глубине около 300 м.

В соответствии со схемой распространения и мощности подмерзлотных криопэгов [Геокриология..., 1989] в северной части профиля широко

распространены подмерзлотные криопэги мощностью от 50 до 200 м (реже более 200 м) и присутствуют мерзлые засоленные породы [Геокриология..., 1989; Захаренко и др., 2012]. Поэтому для получения объективной оценки современного положения подошвы ММП в северной части профиля и интерпретации измерений ЗСБ необходимо привлечение результатов комплексных каротажных измерений УЭС и термометрии по скважинам, расположенным вблизи площади наземных измерений. Такая априорная информация позволяет сопоставить значения УЭС криогенных разностей, выделенных по скважине, с геоэлектрическими моделями, полученными по измерениям на поверхности.

В результате интерпретации данных ЗСБ в мерзлой толще выявлено присутствие межмерзлотного талика. Его мощность изменяется в широ-

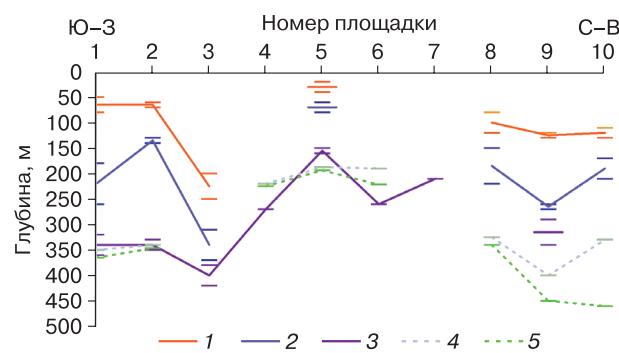


Рис. 6. Усредненная глубина подошвы ММП по геоэлектрическим моделям и по априорным данным, кровли и подошвы межмерзлотного талика.

1 – глубина кровли межмерзлотного талика; 2 – глубина подошвы межмерзлотного талика; 3 – глубина подошвы реликтовых ММП; 4 – глубина подошвы реликтовых ММП по априорным данным; 5 – глубина подошвы криолитозоны по априорным данным.

ких пределах – от около 50 м (площадка № 5) до более 150 м (площадки № 1 и 9). При этом УЭС пород в межмерзлотном талике между г. Ноябрьск и пос. Губкинский изменяется в пределах 100–150 Ом·м, а между поселками Уренгой и Тазовский – от 3 до 10 Ом·м. Разница в УЭС пород межмерзлотного талика объясняется различием в их литологическом составе и минерализацией подземных вод. Для южной части профиля литологический состав представлен песками четвертичного возраста, глинисто-песчаными отложениями и песками позднепалеогенового возраста [Астапов и др., 2012]. В северной части профиля породы межмерзлотного талика представлены глинами и песками раннепалеогенового возраста талицкой свиты [Брадучан и др., 2015; Лебедева и др., 2020], обводненными высокоминерализованными водами. На геоэлектрических моделях нескольких площадок (№ 4, 6, 7) мощный высокомоментный слой с УЭС от 80 до 250 Ом·м не разделяется на слои реликтовых ММП и межмерзлотного талика.

ВЫВОДЫ

В результате интерпретации электроразведочных измерений ЗСБ на субмеридиональном профиле выделяются три области, хорошо коррелирующие с Сибирско-Увальским поднятием, Надым-Пуровским и Пур-Тазовским междуречьями. Самая южная область характеризуется наименьшей суммарной проводимостью разреза до глубины 500 м – около 10 См. Подошва реликтовых ММП здесь отмечена на глубине порядка 350 м. Схожая глубина положения нижней границы ММП (340–350 м) была на опорных геокриологических разрезах в окрестности площадок № 1 и 2, расположенных на расстоянии более 40 км от точек ЗСБ. В центральной области в пределах Надым-Пуровского междуречья отмечается повышение электропроводности разреза до 15–20 См. Граница ММП поднимается на глубину 200–250 м (за исключением площадки № 3, где эта граница по электроразведочным данным отмечена на глубине 400 м). На площадках № 4, 6 и 7 в пределах этой области по значениям УЭС не выделяется межмерзлотный талик. В северной области в пределах Пур-Тазовского междуречья присутствуют хорошо проводящие горизонты с отрицательной температурой, насыщенные высокоминерализованными водами.

При сопоставлении современного положения подошвы реликтовых ММП (на юге она же подошва криолитозоны, так как нет засоленных пород), установленного по данным ЗСБ, с архивными данными отмечаются близкие значения глубин в южной части профиля. Для центральной части профиля современные значения находятся выше

или ниже исторических отметок, но в целом уровень близок к ним. Различия могут быть связаны со значительным удалением объектов априорной информации от точек зондирования методом ЗСБ. Для северной части профиля наблюдаются наибольшие расхождения современных и априорных данных. Для площадок № 8 и 10 подошва ММП не выделена по измерениям ЗСБ, а по априорным данным в районе этих площадок она находилась на глубине 325 и 330 м соответственно. На площадке № 9 по архивным данным подошва ММП выделялась на глубине 400 м, современные измерения показали отметку подошвы ММП на глубине 290–340 м. Различия в результатах электроразведочных и термометрических измерений, вероятно, связаны с засоленными породами в северной части Западно-Сибирской плиты, включающей полуострова Ямал, Тазовский и Гыданский. По данным авторов, засоленность пород распространяется на юг до широты пос. Уренгой ($65^{\circ}57' \text{ с.ш.}$), что согласуется с положением южной границы широкого распространения подмерзлотных криопэгов мощностью 50–200 м [Геокриология..., 1989].

С засоленностью пород и распространением криогенных минерализованных вод, скорее всего, связано различие априорной и современной модели мерзлоты на площадках № 9 и 10 в части присутствия межмерзлотного талика, выделенного по электроразведочным данным и архивным геокриологическим разрезам. Следует отметить, что на этом участке профиля наименьшее расстояние от площадок измерений до объектов априорной информации.

На строение ММП оказывают влияние локальные или азональные факторы, такие как нефтегазовые структуры [Баду, 2014] и подрусловые талики. С последним обстоятельством связана необходимость детализации и подробного изучения строения ММП в современных границах пойм крупных рек.

Благоприятные геологические условия для изучения и дифференциации ММТ методом ЗСБ складываются в южной и центральной частях профиля. На северной части профиля (в присутствии мощной толщи засоленных пород) для интерпретации результатов измерений ЗСБ необходимо привлекать дополнительные скважинные измерения сопротивления и температуры пород.

Несмотря на то что в настоящее время в разных регионах температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд повысилась на $0.5\text{--}2^{\circ}\text{C}$ [Romanovsky et al., 2010], а на поверхности активизируются термоденудационные процессы [Кизяков и др., 2006], на исследуемой территории, по данным ЗСБ, значительных изменений в глубинном строении ММТ со времени изучения опорных геокриологических разрезов в начале 80-х годов прошлого столетия не отмечено.

Благодарности. Полевые работы выполнены в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра “Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мерзлых грунтов под объектами капитального строительства”. Обработка и интерпретация материалов проведена при поддержке программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0024.

Литература

- Агеев В.В.** Изучение процессов вызванной поляризации для решения геокриологических задач // Разведка и охрана недр, 2012, № 11, с. 46–49.
- Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А.** Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2014, т. 55, № 8, с. 1282–1293.
- Астапов А.П., Брадучан Ю.В., Боровский В.В. и др.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Сер. Западно-Сибирская. Лист Р-43 – Сургут. Объяснит. зап. СПб., Картф-ка ВСЕГЕИ, 2012, 342 с.
- Баду Ю.Б.** Влияние газоносных структур на мощность криогенной толщи Ямала // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 3, с. 11–22.
- Белорусова Ж.М.** Многолетняя мерзлота на Тазовском полуострове и история ее развития в четвертичное время // Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Геология. География, 1963, № 12, с. 79–89.
- Брадучан Ю.В., Василенко Е.П., Воронин А.С. и др.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Сер. Западно-Сибирская. Лист Q-43 – Новый Уренгой. Объяснит. зап. СПб., Картф-ка ВСЕГЕИ, 2015, 320 с.
- Геокриология СССР.** Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 454 с.
- Захаренко В.Н., Krakovetskiy Ю.К., Парначев В.П., Попов Л.Н.** Об электропроводности многолетнемерзлых горных пород // Вестн. Том. гос. ун-та, 2012, № 359, с. 182–188.
- Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М., Чернышев А.В.** Три лекции о вызванной поляризации геологической среды. Мюнхен, ФРГ, Вела Ферлаг, 2014, 58 с.
- Карта** мощности и строения толщ ММП Западно-Сибирской плиты / Гл. ред. В.Т. Трофимов, В.В. Баулин. М., Главтюменгеология, МГУ, ПНИИС, 1984, 1 л.
- Кизяков А.И., Лейбман М.О., Передня Д.Д.** Деструктивные рельефообразующие процессы побережий арктических равнин с пластовыми подземными льдами // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 2, с. 79–89.
- Кожевников Н.О.** Быстро протекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 4, с. 527–540.
- Крылов С.С., Бобров Н.Ю.** Применение электромагнитных зондирований для исследования частотной дисперсии электрических свойств мерзлых пород // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 3, с. 59–68.
- Лебедева Е.А., Файбусович Я.Э., Назаров Д.В. и др.** Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Сер. Западно-Сибирская. Лист Q-44 – Тазовский. Объяснит. зап. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2020, 191 с.
- Панькова Д.С., Оленченко В.В., Цибизов Л.В. и др.** Строение многолетнемерзлой толщи в районе стационара Парисенто (Гыданский полуостров) по геофизическим данным // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 2, с. 52–67.
- Сидоров В.А.** Импульсная индуктивная электроразведка. М., Недра, 1985, 192 с.
- Стогний В.В.** Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии. Якутск, ООО “Академия”, 2003, 124 с.
- Стогний В.В.** Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов / В.В. Стогний, Ю.В. Коротков. Новосибирск, Малотиражная тип. 2D, 2010, 121 с.
- Трофимов В.Т.** Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. М., Изд-во Моск. ун-та, 1977, 276 с.
- Трофимов В.Т.** Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты / В.Т. Трофимов, Ю.Б. Баду, Ю.К. Васильчук, П.И. Кашлерюк, В.Г. Кудряшов, Н.Г. Фирсов. М., Наука, 1987, 221 с.
- Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М.** Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики, 2010, № 01 (31), с. 27–31.
- Якупов В.С.** Электропроводность и геологический разрез мерзлотных толщ. М., Наука, 1966, 179 с.
- Cole K.S., Cole R.H.** Dispersion and absorption in dielectrics // J. Chem. Phys., 1941, vol. 6, p. 341–353.
- FastSnap** – Цифровая электроразведочная станция. Руководство по эксплуатации и программному обеспечению. Иркутск, ООО “Сигма-Гео”, 2017, 177 с.
- Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H.** Practical Optimization. N.Y., Academic Press, 1981, 401 p.
- Lee T.** Transient response of a polarizable ground // Geophysics, 1981, vol. 46, No. 7, p. 1037–1041.
- Misurkeeva N., Buddo I., Shelokhov I. et al.** The structure of permafrost in Northern West Siberia: geophysical evidence // Energies, 2022, vol. 15 (8), art. 2847.
- Nelder J.A., Mead R.** A simplex method for function minimization // Comput. J., 1965, No. 7, p. 308–313.
- Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H.** Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007–2009. A synthesis // Permafrost and Glaciation, 2010, vol. 21, p. 106–116.

References

- Ageev V.V. Study of induced polarization processes for solving geocryological problems. Razvedka i okhrana nedr [Exploration and protection of subsoil], 2012, No. 11, p. 46–49.
- Antonov Ye.Yu., Kozhevnikov N.O., Korsakov M.A. Software for inversion of TEM data affected by fast decaying induced polarization. Russian Geology and Geophysics, 2014, vol. 55, No. 8, p. 1019–1027.
- Astapov A.P., Braduchan Yu.V., Borovskiy V.V. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossii Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Zapadno-Sibirskaya. List R-43 – Surgut. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). West Siberian series. Sheet P-43 – Surgut. Explanatory letter]. St. Petersburg, VSEGEI, 2012, 342 p. (in Russian).

- Badu Yu.B. The influence of gas-bearing structures on the cryogenic strata thickness in Yamal area. *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. XVIII, No. 3, p. 11–22.
- Belorusova Zh.M. Permafrost on the Tazovsky Peninsula and the history of its development in Quaternary time. *Vestnik Leningradskogo Universiteta. Seriya geologii i geografii* [Bulletin of Leningrad University. Geology and Geography Series], 1963, No. 12, p. 79–89.
- Braduchan Yu.V., Vasilenko Ye.P., Voronin A.S. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Zapadno-Sibirskaya. List Q-43 – Novyy Urengoy. Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). West Siberian series. Sheet Q-43 – Novy Urengoy. Explanatory letter]. St. Petersburg, VSEGEI, 2015, 320 p. (in Russian).
- Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir' [Geocryology of the USSR. Western Siberia]. E.D. Ershov (ed.). Moscow, Nedra, 1989, 454 p. (in Russian).
- Zakharenko V.N., Krakovetskiy Yu.K., Parnachev V.P., Popov L.N. On the electrical conductivity of permafrost rocks. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University], 2012, No. 359, p. 182–188.
- Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. Three lectures on geological medium induced polarization. Munich, FRG, Vela Verlag, 2014, 55 p.
- Karta moshchnosti i stroyeniya tolshch MMP Zapadno-Sibirskoy plity [Map of the thickness and structure of permafrost strata of the West Siberian Plate]. V.T. Trofimov, V.V. Baulin (eds.). Moscow, Glavyumen'geologiya, MGU, PNIIIS, 1984, 1 s. (in Russian).
- Kizyakov A.I., Leibman M.O., Perednya D.D. Destructive relief-forming processes at the coasts of the Arctic plains with tabular ground ice. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2006, vol. X, No. 2, p. 79–89.
- Kozhevnikov N.O. Rapid induction-induced polarization in frozen rocks. *Geology and Geophysics. Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2012, vol. 53, No. 4, p. 527–540.
- Krylov S.S., Bobrov N.Yu. Application of the electromagnetic soundings for the investigation of frequency dispersion of the frozen ground's electrical properties. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2002, vol. VI, No. 3, p. 59–68.
- Lebedeva Ye.A., Faybusovich Ya.E., Nazarov D.V. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:1 000 000. Tret'ye pokoleniye. Seriya Zapadno-Sibirskaya. List Q-44 – Tazovskiy. Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation on a scale of 1:1,000,000. Third generation. West Siberian series. Sheet Q-44 – Tazovsky. Explanatory note]. St. Petersburg, VSEGEI, 2020, 191 p. (in Russian).
- Pankova D.S., Olenchenko V.V., Tsibizov L.V. et al. The structure of permafrost within Parisento station (Gydan Peninsula) from geophysical data. *Earth's Cryosphere*, 2020, vol. XXIV, No. 2, p. 45–59.
- Sidorov V.A. Impul'snaya induktivnaya elektrorazvedka [Pulsed inductive electrical prospecting]. Moscow, Nedra, 1985, 192 p. (in Russian).
- Stogniy V.V. Impul'snaya induktivnaya elektrorazvedka talikov kriolitozony Tsentral'noy Yakutii [Pulsed inductive electrical prospecting of taliks in the permafrost zone of Central Yakutia]. Yakutsk, OOO "Academy", 2003, 124 p. (in Russian).
- Stogniy V.V., Korotkov Yu.V. Poisk kimberlitovykh tel metodom perekhodnykh protsessov [Prospecting for kimberlite bodies using the transient process method]. Novosibirsk, Small circulation printing house 2D, 2010, 121 p. (in Russian).
- Trofimov V.T. Zakonomernosti prostranstvennoy izmenchivosti inzhenerno-geologicheskikh usloviy Zapadno-Sibirskoy plity [Patterns of spatial variability of engineering-geological conditions of the West Siberian Plate]. Moscow, Moscow Univ. Press, 1977, 276 p. (in Russian).
- Trofimov V.T., Badu Yu.B., Vasil'chuk Yu.K., Kashleryuk P.J., Kudryashov V.G., Firsov N.G. Geokriologicheskoye rayonirovaniye Zapadno-Sibirekoy plity [Geocryological zoning of the West Siberian Plate]. Moscow, Nauka, 1987, 221 p. (in Russian).
- Sharlov M.V., Agafonov Yu.A., Stefanenko S.M. Modern telemetric electrical survey stations SGS-TEM and FastSnap. Efficiency and experience of use. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki* [Instruments and systems of exploration geophysics], 2010, No. 1 (31), p. 27–31 (in Russian).
- Yakupov V.S. Elektroprovodnost' i geologicheskiy razrez merzlotnykh tolshch [Electrical conductivity and geological section of permafrost strata]. Moscow, Nauka, 1966, 179 p. (in Russian).
- Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorbtion in dielectrics. *J. Chem. Phys.*, 1941, vol. 6, p. 341–353.
- FastSnap – Tsifrovaya elektrorazvedochnaya stantsiya. Rukovodstvo po ekspluatatsii i programmnomu obespecheniyu [FastSnap Digital electrical prospecting station. Operation and software manual]. Irkutsk, Sigma-Geo LLC, 2017, 177 p. (in Russian).
- Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H. Practical Optimization. N.Y., Academic Press, 1981, 401 p.
- Lee T. Transient response of a polarizable ground. *Geophysics*, 1981, vol. 46, No. 7, p. 1037–1041.
- Misyurkeeva N., Buddo I., Shelokhov I. et al. The Structure of Permafrost in Northern West Siberia: Geophysical Evidence. *Energies*, 2022, vol. 15 (8), art. 2847.
- Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization. *Comput. J.*, 1965, No. 7, p. 308–313.
- Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H. Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007–2009. A synthesis. *Permafrost and Glaciers*. Process., 2010, vol. 21, p. 106–116.

*Поступила в редакцию 31 марта 2024 г.,
после доработки – 5 июля 2024 г.,
принята к публикации 2 сентября 2024 г.*