

КРИОЛИТОГЕНЕЗ

УДК 550.370; 550.372; 550.379

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-5(35-48)

**СТРОЕНИЕ ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА ЮЖНОЙ ОКРАИНЫ
ЛЕНО-АМГИНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ПО ДАННЫМ МЕТОДА
ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ****Л.Г. Нерадовский***Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; leoner@mpi.ysn.ru*

Выполнен кластерный анализ данных вертикального электрического зондирования южной окраины области распространения ледового комплекса по оси проектируемой трассы железной дороги Беркакит–Томмот–Якутск на участке Томмот–Кердём. На этом участке геоэлектрический разрез сильно изменчив и отражает пятярусное строение ледового комплекса. Наиболее насыщены льдом верхняя и средняя части комплекса до глубины 30 м (1–3-й ярусы), сложенные толщей сильнольдистых суглинков с повторно-жильными льдами. Ниже, до глубины 50–60 м, залегают 4–5-й ярусы с включением залежей льдов неизвестной природы и возможным присутствием в четвертично-третичных отложениях льдов фирнового происхождения. По данным вертикального электрического зондирования и электромагнитного профилирования, льдистость суглинков в верхней части ледового комплекса до глубины 10–15 м снижается на стыке Маганской и Эмильской террас Лено-Амгинского междуречья (705-й километр трассы). Здесь заканчивается обширная аласовая провинция (термокарстовые котловины) низкосредневысотных террас правобережной части долины р. Лены. Резкое уменьшение числа залежей ископаемых льдов в верхней части разреза южной окраины комплекса и полное исчезновение льдов в нижней части разреза происходит на 697-м километре, на вершине Эмильской террасы. Далее (в 3 км) распространение залежей льдов в верхней части террасы до глубины не более 10 м носит эпизодический характер (с вероятностью около 0.1 %).

Скважины, ледовый комплекс, залежи льдов, вертикальное электрическое зондирование, геоэлектрический разрез, кластерный анализ, удельное электрическое сопротивление

**ICE COMPLEX STRUCTURE INFERRED FROM VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING
(SOUTHERN MARGIN OF THE LENA-AMGA INTERFLUVE)****L.G. Neradovskii***Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; leoner@mpi.ysn.ru*

Discussed are the results of a cluster analysis of vertical electrical sounding data with an aim to characterize the Ice Complex structure in its southern margin stretching along the Berkakit–Tommot–Yakutsk railway corridor (the Tommot–Kerdem section). In this area, the geoelectrical section is strongly variable and generally reflects a 5-layer structure of the Ice Complex. Ice contents are higher in the upper 30 m of the Ice Complex (layers 1–3) which consist of very ice-rich silts with relict syngenetic ice wedges. Layers 4 and 5 occurring lower (to depths of 50–60 m), contain massive ice bodies of unknown origin, which does not preclude the presence of firn ice in Quaternary–Tertiary sediments. The data obtained by vertical electrical sounding and electromagnetic profiling indicate a strong decrease in volumetric ice content in the upper 10–15 m silts (705-th track kilometer) at the boundary between the Magan and Emilskaya terraces in the Lena–Amga watershed, which is the southern end of the vast alas province (thermokarst basins) of the low to medium-height terraces along the right bank of the Lena River valley. A drastic reduction in the amount of buried massive ice bodies in the upper layers of the southern margin section and complete disappearance in the lower layers of the Ice Complex occur at the 697-th track kilometer, on the top of the Emilskaya terrace. Within 3 km further south, ice bodies in the upper 10 m from the terrace surface are only sporadically present, with the occurrence probability of 0.1 %.

Boreholes, Ice Complex, massive ground ice, vertical electrical sounding, geoelectric section, cluster analysis, electrical resistivity

ВВЕДЕНИЕ

Ледовый комплекс Лено-Амгинского междуречья является крупным геоморфологическим элементом Центрально-Якутской низменности и

отличается криогенным своеобразием и сложностью геологического строения. В середине прошлого столетия на этом междуречье проводились

крупные научно-производственные исследования, среди которых наиболее представительными по объему и содержанию были якутские экспедиции “Желдорпроект”, ГУЛЖДС МВД СССР (1948–1951 гг.), АН СССР (1950–1954 гг.), геологоразведочного управления (1951–1954 гг.). В экспедициях участвовали ученые-мерзловеды А.А. Григорьев, Н.А. Граве, А.И. Ефимов, П.А. Соловьев, П.А. Шумский, Н.И. Иванов, И.Н. Вотяков, а также известные геофизики Л.А. Добровольский, Б.Н. Достовалов, Р.И. Коркина и др.

В ходе экспедиций был собран обширный фактический материал по строению Лено-Амгинского междуречья. При этом разный взгляд ученых на природу ледового комплекса не помешал выделить его главную отличительную особенность – присутствие ископаемых залежей льдов. Эту общую точку зрения сформулировал П.А. Соловьев [1959], трактуя ледовый комплекс как “особый горизонт, насыщенный жилами льда, более или менее единый и плащеобразно залегающий на обширных участках, но неоднородный по возрасту, составу, генезису и мощности” (с. 49).

Анализируя и систематизируя собранный разрозненный фактический материал экспедиций, П.А. Соловьев пришел к заключению о преобладающем распространении повторно-жильных льдов (ПЖЛ) в ледовом комплексе Лено-Амгинского междуречья. Более того, на основании геоморфологического и ландшафтного сходства двух крупных междуречий Центрально-Якутской низменности – Лено-Амгинского и Лено-Вилюйского – П.А. Соловьев допустил возможность распространения залежей ПЖЛ во всей аласной провинции низкосредневысотных террас долины р. Лены в среднем ее течении [Соловьев, 1959, с. 4].

Такое допущение обоснованно для хорошо изученной упомянутыми экспедициями верхней части ледового комплекса до глубины 5–7 и 10–15 м, а природа ископаемых льдов в средней и нижней частях ледового комплекса остается неизвестной и не обязательно связанной с распространением залежей ПЖЛ. Например, при бурении скважин Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН в 2005 и 2011 гг. на возвышенной части северной окраины Лено-Амгинского междуречья под верхним ярусом залежей ПЖЛ был обнаружен нижний ярус льдов фирнового генезиса [Спектор и др., 2011]. Возможно, что и в иных местах междуречья ледовый комплекс имеет аналогичное или более сложное многоярусное полигенетическое строение. Так это или не так, покажут будущие научные исследования, а пока остается нерешенным вопрос о строении и мощности ледового комплекса в отдельно взятых ярусах или по всему разрезу четвертичных отложений. Поиск ответа на этот вопрос приобретает особую актуальность в связи с

возросшим темпом промышленного и сельскохозяйственного освоения Центрально-Якутской низменности.

Цель настоящей статьи – исследовать строение и мощность ледового комплекса в отдельно взятых ярусах или по всему разрезу четвертичных отложений. Для достижения этой цели выполнен статистический анализ данных, полученных на южной окраине ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

Этот классический метод наземной геоэлектрики применяется в тех случаях, когда главным при решении инженерно-геологических и иных задач является не детальное изучение границ неоднородностей геоэлектрического разреза (для чего с успехом используется метод электротомографии), а необходимость выяснения в общих чертах закономерностей изменения структурных особенностей разреза по глубине, латерали и во времени. О важности применения такого подхода в инженерном мерзлотоведении при решении задач прогноза состояния мерзлых пород писал В.П. Мельников [1977]: “Необходимы сведения о том, как параметры электромагнитного поля характеризуют не отдельные элементы интересующей нас части разреза, а в целом разрез участка, района, типа ландшафта и т. д. Критериями оценок могут выступать типы кривых ВЭЗ” (с. 60).

Преимущество такого интегрированного подхода в расширенном виде при изучении геологической среды подчеркивали Б.С. Светов и М.Н. Бердичевский, проводя аналогию между методами стационарной электроразведки и гравимагниторазведки. В единстве интегральной природы электрических, гравитационных и магнитных полей эти выдающиеся ученые-геофизики видели возможность отказаться от практики получения избыточных данных, ориентируясь на комплексное изучение максимально независимых друг от друга параметров полей [Светов, Бердичевский, 1998].

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

На карте мелкомасштабного районирования криолитозоны Якутии по мерзлотно-грунтовым условиям строительства Центрально-Якутская низменность занимает северо-восточную часть Лено-Вилюйского и северную часть Лено-Алданского междуречья, включая Лено-Амгинское междуречье [Мельников, 1968]. На территории этого обширного междуречья коренное основание долины р. Лены сложено палеозойскими и мезозойскими породами, повсеместно перекрытыми толщей кайнозойских отложений преимущественно аллювиального генезиса. Мощность аллювия изменчива и в отложениях четвертичного и третичного возраста достигает 60–100 и 200–300 м соответ-

ственно [Соловьев, 1959, с. 19]. Мощность мерзлых пород на междуречье по трассе “Лена” изменяется, по данным электрического каротажа скважин и метода ВЭЗ, от 400 м (Бестяхская терраса р. Лены) до 230–260 м (район пос. Качикатцы) [Калинин, Якутов, 1989, с. 90].

На правобережной Маганской террасе долины р. Лены, где расположена часть участка работ, выполняемых методом ВЭЗ, ледовый комплекс подстилается осадочными породами. В них принимают участие юрские песчаники, алевролиты, а также кембрийские известняки, доломиты, залегающие на глубине 80–120 м. Выше залегают разнозернистые пески с галькой, а еще выше супеси, суглинки и глины с галькой [Соловьев, 1959, с. 24]. По данным проектно-изыскательских работ, четвертичные отложения до глубины 10–20 м сложены преимущественно пылевато-илистыми и супесчано-суглинистыми разностями. Эти образования являются материнской средой для ПЖЛ, вероятность встречи которых, например, на средневысотной правобережной Абалахской террасе долины р. Лены равна 30–88 % [Соловьев, 1959, с. 43]. Также ПЖЛ наблюдаются на более высокой Маганской террасе долины р. Лены.

По существующим представлениям, ПЖЛ и вмещающие их отложения образовались в каргинское (морская изотопная стадия, МИС-3) и сартанское (МИС-2) время позднего неоплейстоцена [Иванов, 1984; Гриненко и др., 1995].

Участок геофизических исследований расположен на 694–707-м км между станциями Томмот и Кердём (рис. 1), где на период проведения работ методом ВЭЗ ось проектируемой железнодорожной трассы Беркаakit–Томмот–Якутск пересекала южную окраину залесенного ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья. По заданию ОАО “Проекттрансстрой” на этом проблемном для строительства участке нужно было уточнить строение ледового комплекса, а также ответить на вопрос, интересующий и проектировщиков, и ученых-геокриологов: полностью или частично выклинивается ледовый комплекс при переходе последней правобережной средневысотной Маганской террасы на высокую эрозионную Эмильскую террасу¹ долины р. Лены? Иначе говоря, в том месте Лено-Амгинского междуречья, где по данным ландшафтного и геоморфологического районирования происходит переход аласно-долинного района в подрайон переходной полигенетической равнины [Варламов и др., 2006]. Стоит добавить, что именно здесь геокриологи проводят южную границу ледового комплекса, руковод-

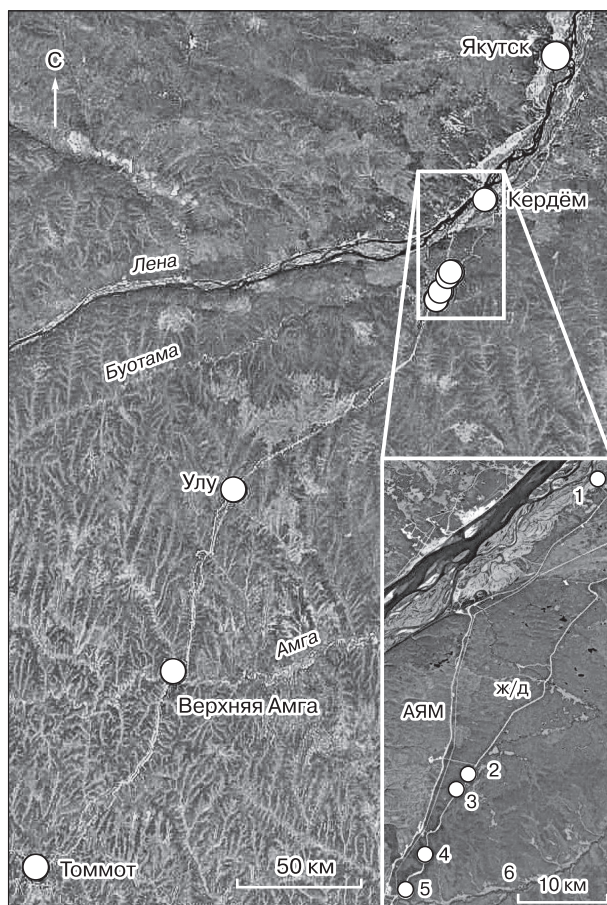


Рис. 1. Общее местоположение на космическом снимке и фрагмент участка работ, выполняемых методом ВЭЗ по трассе железной дороги (врезка справа) в окрестности автомагистрали “Лена”:

1 – пос. Кердём; 2 – 707-й км трассы (конец участка работ – точка ВЭЗ № 51); 3 – 705-й км трассы (стык Маганской и Эмильской террас); 4 – 697-й км (южная граница практически полного выклинивания ледового комплекса); 5 – 694-й км (начало участка работ – точка ВЭЗ № 1); 6 – р. Верхняя Лютенга.

ствуясь термокарстовой гипотезой происхождения аласов² [Аболин, 1929].

Строение ледового комплекса на участке работ методом ВЭЗ (694–707-й км) сравнительно детально изучено в 2005 г. Якутской поисково-съёмочной экспедицией (ЯПСЭ), выполнившей через 150–200 м в полосе оси АЯМ проходку 104 скважин колонкового бурения глубиной 5–20 м с отбором проб грунта на лабораторный анализ.

¹ Эта терраса и другие, более высокие террасы являются денудационными и представлены на водоразделах переходной полигенетической равнины плакоров в виде небольших по размерам останцов.

² Местное якутское население видит в этом понятии замкнутые и полузамкнутые посреди леса провальные котловины с озером или без него на плоских междуречных пространствах [Босиков, 1991, с. 6].

По данным бурения, разрез участка сложен суглинками с редкими прослоями песков. По данным ЯПСЭ, температура пород в нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине 10 м изменялась от -1.3 до -4.8 °С при среднем значении -3.2 °С. Коренные породы были вскрыты лишь шестью скважинами на Эмильской террасе. Коренные породы (известняки) были вскрыты скважинами № 506, 507, 524 (693.7–694.1 км) на 9.2–9.8 м. Плотный песок с обломками известняка вскрыт скважиной № 563 на 3.8 и 9.6 м (696.2 км). Белый песок и песчаник были вскрыты скважиной № 564 на 9.1 и 11.8 м (696.3 км), а желто-оранжевый песок и сильноожеженный красно-бурый песчаник – скважиной № 565 на 3.6 и 17.3 м (696.1 км).

Результаты бурения скважин ЯПСЭ показывают, что в направлении на юг (в сторону пос. Томот) в ледовом комплексе происходят одновременное уменьшение мощности и смена состава, генезиса дисперсных пород в виде замещения озерно-аллювиальных суглинков Маганской террасы на элювиально-делювиальные суглинки и пески Эмильской террасы. На этом участке ледовый комплекс состоит из двух ярусов или горизонтов сильнольдистых дисперсных грунтов (преимущественно суглинков), залегающих в среднем на глубинах 1–3 и 6–8 м. При уровне коэффициента доверия 95 % случайный разброс глубины залегания границ составил $\pm(0.1-0.4)$ и ± 0.5 м.

По лабораторным данным, льдистость грунтов глинистого состава за счет видимых ледяных включений (i) и объемная льдистость в 1-м и 2-м ярусах соответственно изменялись в интервалах 27.4–77.7 и 25.0–87.7 % при средних арифметических значениях (45.8 ± 2.2) и (52.9 ± 4.3) %; грунты классифицируются как сильнольдистые [ГОСТ 25100-2011, 2018]. Для АЯМ коэффициенты вариации показателя i и глубины залегания границы 1-го и 2-го ярусов сильнольдистых и очень сильнольдистых ($i > 60$ %) дисперсных грунтов равны 20–27 %, тогда как изменчивость мощности ярусов (составляющая в среднем 2 м) достигает 71 %.



Рис. 2. Фрагмент обширного обнажения полигонально-жильных льдов на участке реконструкции АЯМ в 2011 г. в районе пос. Качикатцы.

Фото Л.Г. Нерадовского.

Из всех пробуренных скважин ЯПСЭ фрагменты залежи ПЖЛ (прослой и слой льда с вертикальными прожилками вмещающего грунта) были обнаружены в 44 точках скважин. Отсюда следует, что по данным буровых работ доля ПЖЛ на изученном методом ВЭЗ участке проектируемой трассы железной дороги составляет 40 %.

Из статистического анализа данных буровых работ ЯПСЭ следует, что при коэффициенте доверия 95 % залежи ПЖЛ, сильнольдистых и очень сильнольдистых грунтов образуют в ледовом комплексе три яруса, залегающих в среднем на глубинах 2.5–5.8, 4.6–7.9, 8.5–10.1 м с разбросом единичных значений в диапазоне $\pm(0.1-0.8)$, $\pm(0.6-1.2)$, $\pm(3.0-2.9)$ м. Первый ярус встречается чаще, чем нижние ярусы (вероятность встречи 1-го яруса 25 %, а 2-го и 3-го – 18.3 и 4.8 %).

Коэффициенты вариации глубины залегания верхней, нижней границ и мощности залежей ПЖЛ 1–3-го ярусов равны 14/34/61, 28/36/85, 28/22/83 % соответственно. Судя по этим цифрам, залежи ПЖЛ в трех ярусах (как сильнольдистые и очень сильнольдистые грунты) в меньшей степени динамичны по глубине залегания границ, чем по мощности. Такой на первый взгляд парадокс объясняется статистическими нюансами, а именно тем, что вариации единичных значений мощности залежей ПЖЛ оказываются сравнимыми с ее средними значениями.

Итак, по данным буровых работ ЯПСЭ, южная окраина ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья имеет сложное строение в виде сочетания двух ярусов сильнольдистых и очень сильнольдистых грунтов с тремя ярусами залежей ПЖЛ. Первый ярус сильнольдистых и очень сильнольдистых грунтов с залежами ПЖЛ встречается чаще нижних ярусов. Причем в 78 % случаев скважины ЯПСЭ случайно вскрывали боковые апофизы или плечи залежей ПЖЛ мощностью 0.1–1.0 и 1.4–4.6 м. Лишь в 7 и 25 % случаев скважины попадали в середину залежей ПЖЛ мощностью 7–9 м или на примыкающую к ней боковую часть мощностью 4–5 м.

Вдоль проектируемой железнодорожной трассы (693–736-й км) распределение мест скопления залежей ПЖЛ до глубины 10 м в 1-м ярусе ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья было ранее изучено (до постановки работ методом ВЭЗ) методом дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП) [Нерадовский, 2008].

Сложное и непредсказуемое очертание границ ПЖЛ, погребенных под слоем суглинков на глубине около 3 м, иллюстрируется рис. 2. На рис. 2 приведен фрагмент редкого обнажения 1-го яруса залежей ПЖЛ ледового комплекса на Маганской террасе Лено-Амгинского междуречья во время реконструкции трассы «Лена» в районе ее сближения с эксплуатируемым участком трассы

железной дороги Томмот–Кердём–Нижний Бестях примерно в 1–3 км от северной границы участка исследования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика работ, выполняемых методом ВЭЗ, описана в инструкции по электроразведке [*Инструкция...*, 1984, с. 129–136], учебных пособиях А.И. Заборовского, Ю.В. Якубовского, В.К. Хмелевского и др. Поэтому ограничимся кратким описанием необходимых для понимания особенностей полевых работ и обработки данных метода ВЭЗ на изученном участке ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья.

Работы методом ВЭЗ проводились летом 2006 г. установкой Шлюмберже с длиной полуразноса (АВ/2) питающей линии от 0.3 до 220 м. Расстояние между точками ВЭЗ составляло 200 м. Ток и напряжение в питающей и приемной линиях длиной 0.2 и 6.0 м измерялись электронным автокомпенсатором АЭ-72. Переход измерений³ напряжения и силы тока с первой на вторую приемную линию производился при АВ/2 = 9 и 15 м.

В качестве источника питания постоянного тока применялся автономный переносной комплект из бытовых круглых батареек и специализированных анодных батарей марки 100 АМЦГУ-190С с возможностью ступенчатого изменения напряжения в питающей цепи в широком диапазоне – от 1.5 до 400 В.

Результаты полевых измерений (кривые ВЭЗ) обрабатывались с использованием программы IP12Win [*Руководство...*, 2001]. В начале обработки применялась предложенная авторами программы стратегия автоматического распознавания типа модели геоэлектрического разреза с заданием оптимального минимального числа слоев. Далее осуществлялись интерактивный подбор и уточнение типа модели геоэлектрического разреза с автоматическим расчетом его параметров: удельного электрического сопротивления (УЭС), глубины залегания верхней, нижней границ и мощности электрических слоев.

Знание общего геологического и криогенного строения ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья упростило поиск достоверных интерпретационных решений о типе и параметрах слоев геоэлектрического разреза. Повышению точности вычисления параметров слоев способствовало знание мощности сезонноталого слоя, определяемой металлическим щупом, а также природы максимумов кажущегося сопротивления (КС), которые указывали на появление в однородной толще суглинков слоев с относительно высокими значе-

ниями УЭС. При неизменной литогенной основе ледового комплекса высокоомные слои с большой степенью вероятности соответствовали интервалам глубин с высокими средневзвешенными значениями объемной льдистости за счет роста текстурной льдистости дисперсных грунтов и за счет многочисленных ПЖЛ.

Глубина залегания верхней пологой границы залежей ПЖЛ устанавливалась по данным бурения скважин и метода ВЭЗ с учетом местоположения локальных или фоновых аномалий метода ДЭМП. Однако найти с приемлемой точностью положение нижней границы залежей ПЖЛ, руководствуясь максимальной глубиной проникновения в грунт разветвленной сети мелких жилок льда мощностью в единицы или первые десятки сантиметров, невозможно ни бурением скважин, ни методами геофизики.

Существуют и другие причины, ограничивающие повышение точности определения структурных параметров отдельных ярусов или всего ледового комплекса. Методическая причина состоит в повсеместном применении в инженерно-геологических изысканиях схемы неравномерного избирательного отбора проб грунта из керна скважин⁴ на лабораторный анализ свойств мерзлых грунтов, в частности их льдистости. Техническая причина связана с отсутствием стандартизированной и метрологически пригодной аппаратуры для электрокаротажа скважин глубиной 10–20 м.

Поскольку не было возможности получить более полные сведения о распределении по глубине льдистости и электрического сопротивления мерзлых грунтов, были сделаны приблизительные оценки мощности всего ледового комплекса и его отдельных ярусов по усредненному положению их общей нижней границы, огибающей основную массу ископаемых льдов без учета их происхождения. Такой интегрированный подход заложил П.А. Соловьев в своем определении ледового комплекса [*Соловьев, 1959*] и Н.А. Граве, предложивший метод площадного картирования границ ледового комплекса не по единичным залежам ПЖЛ, а по их совокупности, как единого геокриологического образования, выражаемого на поверхности земли ее ландшафтом и геоморфологией [*Граве, 1944*].

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ

Задача классификации, или типизации строения геоэлектрического разреза решалась путем анализа формы кривых ВЭЗ. В соответствии с этим признаком геоэлектрический разрез изученного участка ледового комплекса состоял из

³ Такая простейшая схема электрических зондирований с максимальным полуразносом 1000–1500 м была разработана в конце 1960–1970-х гг. в ИМЗ АН СССР с целью изучения мощности мерзлых пород до глубины в несколько сотен метров.

⁴ Из каждой литологической разности грунта отбирается по одной пробе.

3–5 слоев с разнообразным распределением по laterали и глубине значений УЭС. В редких случаях (вероятность 1–8 %) геоэлектрический разрез имел строение типа Н, К, НА, НК, КН, НАК, АКQ, QQN, КНК, АКНК. Чаще всего он имел строение типа А, АК, АКН, НКН. С пояснением, расшифровкой аббревиатуры типов геоэлектрического разреза можно ознакомиться в классических учебниках по электроразведке А.И. Заборовского, Ю.В. Якубовского и Л.Л. Ляхова, В.К. Хмелевского и др. [Заборовский, 1963; Якубовский, Ляхов, 1988; Электроразведка..., 1994].

В общей совокупности фактического материала, состоящего из 65 точек ВЭЗ, высокоомные слои геоэлектрического разреза с элементом “К”, которые фиксируются по относительно максимальным значениям кажущегося сопротивления на кривых ВЭЗ, доминируют и составляют 71 %. Геоэлектрический разрез построен с учетом абсолютных отметок рельефа (рис. 3, в), приведены разрез значений КС (рис. 3, б) и графики суммарной продольной проводимости (рис. 3, а). Графики построены на трех интервалах глубин, подоб-

ранных таким образом, чтобы по динамике проводимости грунтов составить общее представление о распределении объема ископаемого льда в ледовом комплексе по глубине и вдоль АЯМ.

Первый срез геоэлектрического разреза сделан до глубины 10 м, т. е. на этой глубине исследуется ледовый комплекс преимущественно мелкими проектно-изыскательскими скважинами. До этой глубины ледовый комплекс, детально изученный буровыми работами, состоит из трех ярусов залежей ПЖЛ. Высокая степень насыщенности дисперсных грунтов (в основном суглинков) верхней части комплекса подземным льдом (ПЖЛ) обуславливает низкую проводимость геоэлектрического разреза на первом срезе глубины.

На втором срезе, заданном до глубины 50 м, проводимость дисперсных грунтов песчано-глинистого состава озерно-аллювиального генезиса растет, что означает снижение общего объема ископаемого льда в средней и нижней частях ледового комплекса.

Третий срез геоэлектрического разреза задан до глубины 100 м, исходя из общих представлений

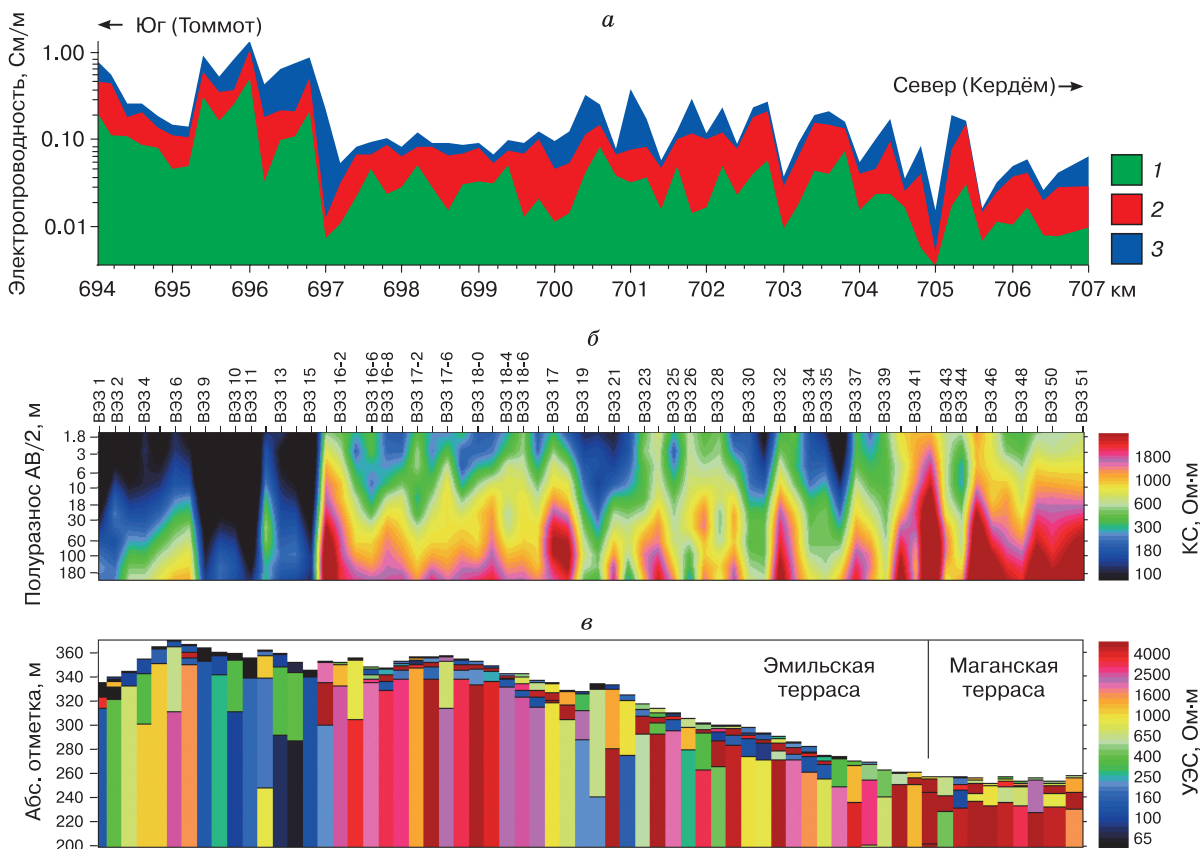


Рис. 3. Ледовый комплекс Лено-Амгинского междуречья на участке проектируемой трассы железной дороги (694–707-й км):

а – суммарная продольная электрическая проводимость грунтов на трех интервалах глубин: 1 – 0–10 м, 2 – 0–50 м, 3 – 0–100 м; б – разрез кажущихся электрических сопротивлений (КС), АВ/2 – полуразнос; в – геоэлектрический разрез. Кривые ВЭЗ обработаны в программе IPI2Win.

о геологическом строении ледового комплекса на Лено-Амгинском междуречье, т. е. до глубины наиболее вероятного исчезновения залежей ископаемых льдов полигенетической природы на границе перехода четвертичных и третичных отложений в комплекс осадочных пород цоколя Маганской и Эмильской террас. В этой части разреза проводимость грунтов продолжает расти, но не так сильно, как ожидалось согласно предположению об исчезновении льдов.

Несоответствие ожидаемого и наблюдаемого поведения проводимости объясняется высокими значениями УЭС коренных осадочных пород, сравнимых с УЭС нерасчлененного слоя ледо-грунтов и льдов. По данным первого исследователя Лено-Амгинского междуречья геофизика Р.И. Коркиной, единичные значения УЭС известняков и песчаников, слагающих цоколь Тюнгионской и Абалахской террас, достигают 8000–20 000 Ом·м [Коркина, 1949].

На изученном участке Маганской и Эмильской террас максимальные значения УЭС слоев, слагающих нижнюю часть геоэлектрического разреза, близки к данным Р.И. Коркиной и равны 6800–8500 Ом·м. В средних показателях они ниже, но сравнимы с УЭС сильнольдистых и очень сильнольдистых грунтов и залежей ПЖЛ верхних ярусов ледового комплекса (2125–2765 Ом·м).

Анализ рис. 3 указывает на три особенности. Во-первых, наблюдается высокая дифференциация строения геоэлектрического разреза вдоль АЯМ. Во-вторых, с увеличением глубины растет фон значений КС. В-третьих, в направлении на юг (в сторону станции Томмот) проводимость грунтов скачкообразно увеличивается сначала на 705-м (в 2 раза), затем еще больше (почти в 5 раз) на 697-м километрах. Эта особенность не менее четко отображается на разрезе КС (см. рис. 3, б).

Первая и вторая особенности отражают структурно-петрофизическую неоднородность ледового комплекса по латерали и глубине. Третья особенность (локально проявленная на 705-м км) привязана к стыку Маганской и Эмильской террас, где происходит исчезновение термокарстовых котловин (аласов) с вытаявшими залежами ископаемых льдов.

По совокупности имеющегося геолого-геофизического материала, представленного данными ландшафтно-геоморфологического районирования, буровых работ ЯПСЭ, методов ВЭЗ и ДЭМП, на 705-м километре происходит резкое снижение льдистости верхней части ледового комплекса. Это особенно заметно до глубины 10 м по данным ДЭМП на графиках отношения вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_r) компонент гармонического поля вертикального магнитного диполя на частоте 1.125 МГц (рис. 4). Результаты получены методом

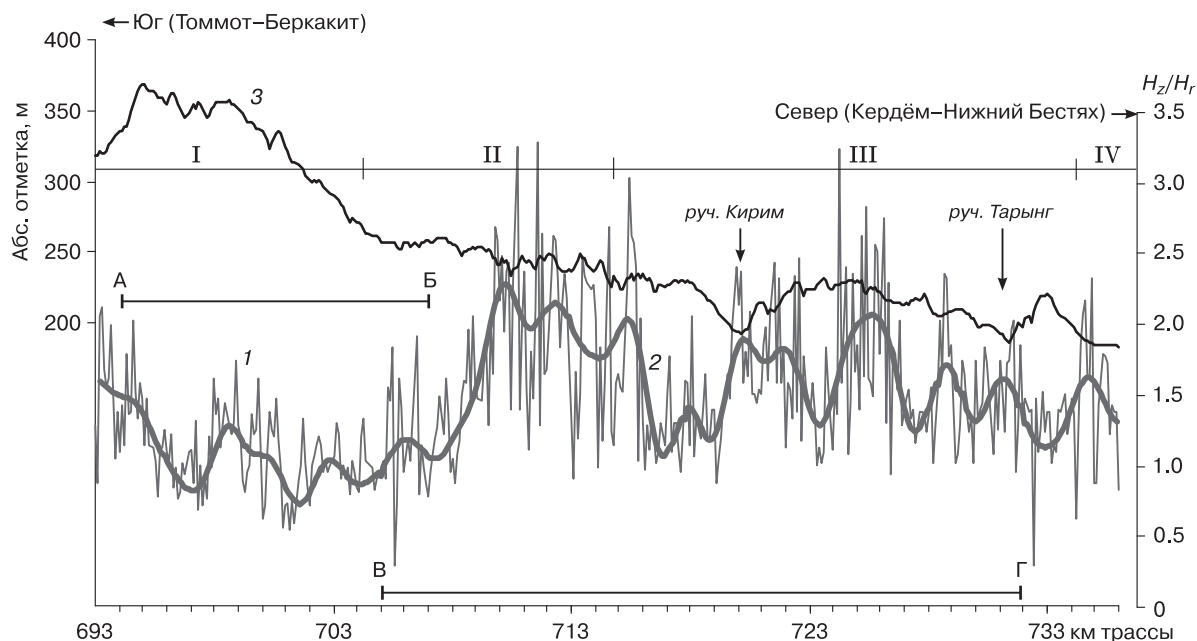


Рис. 4. Результаты исследований ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья на участке станций Томмот–Кердём проектируемой трассы железной дороги Томмот–Беркакит–Якутск [Нерадовский, 2008, с. 463].

I–IV – террасы долины р. Лены: I – Эмильская; II – Маганская; III – Абалахская; IV – Тюнгионская. 1 – исходные значения H_z/H_r ; 2 – сглаженные отфильтрованные (фоновые) значения H_z/H_r ; 3 – рельеф земной поверхности. А–Б – границы участка работ методом ВЭЗ; В–Г – границы ледового комплекса с высокой объемной льдистостью до глубины 10 м за счет большой концентрации по латерали залежей повторно-жильных льдов.

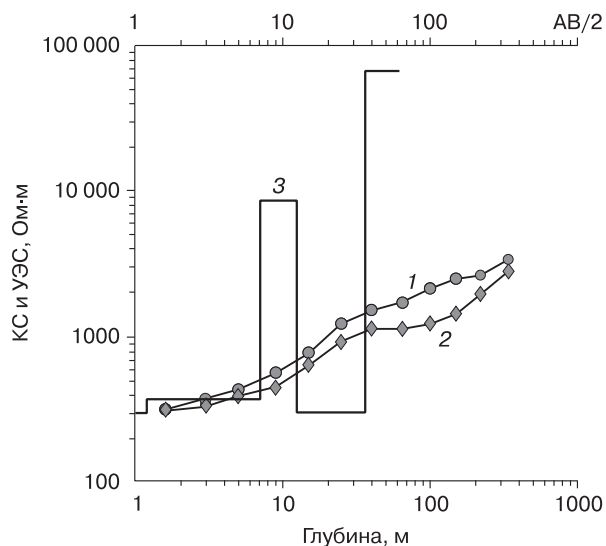


Рис. 5. Сводные кривые ВЭЗ, усредненные по арифметической (1) и медианной (2) метрике.

3 – глубина залегания границ и мощности обобщенного геоэлектрического разреза южной окраины ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья.

ДЭМП при разносе между приемно-передающими антеннами 20 м и расстоянии между точками измерений по оси трассы 10 м.

Судя по уменьшению изрезанности (дисперсии⁵) графика проводимости на срезах глубин до 50 и 100 м, основная масса нижней части ледового комплекса, сосредоточенная в 3–5-м ярусах залежей ПЖЛ и иных льдов полигенетической природы, залегающих ниже 10–20 м, простирается с постепенным снижением льдистости до 700 км. Здесь, на склоне Эмильской террасы, наблюдается небольшое понижение в рельефе с глубиной вреза до 10 м. Выклинивание нижней части ледового комплекса с резким уменьшением числа залежей ископаемых льдов до полного их исчезновения происходит на вершине Эмильской террасы (697-й км), где наблюдается обширная по размерам ложбина глубиной до 20 м, образовавшаяся предположительно в ходе денудации одной из крупных тектонических депрессий. Далее 697-го км, судя по данным буровых работ ЯПСЭ и ИМЗ СО РАН, появление единичных залежей ПЖЛ не исключается, но носит фрагментарный неупорядоченный характер с очень низкой вероятностью встречи – около 0.1 %.

⁵ Мера неоднородности строения геоэлектрического разреза в горизонтальном направлении.

⁶ Аналогичные кривые ВЭЗ наблюдались на севере Лено-Амгинского междуречья в пределах аллювиальной плейстоценовой равнины Лено-Таттинского междуречья [Мельников, Нисковских, 1978, с. 62–64].

⁷ Они не могут быть высокими из-за того, что методом ВЭЗ в большом объеме зондирования изучается не одна залежь ПЖЛ, а полигональная система залежей ПЖЛ, разделенных промежутками глинистых грунтов с присущей им повышенной или высокой засоленностью. Кроме того, каждая залежь ПЖЛ в той или иной мере содержит органические остатки и прослои вмещающих пород.

Основные доминирующие черты геоэлектрического разреза южной окраины ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья отражены на сводной кривой ВЭЗ типа АКН⁶, полученной по фактическому материалу из 65 точек зондирования (рис. 5). Медианный вариант обобщения точнее передает форму сводной кривой ВЭЗ для преобладающего типа геоэлектрического разреза, поэтому на рис. 5 представлены медианные значения параметров геоэлектрического разреза. В целом совокупность высокоомных слоев геоэлектрического разреза интерпретируется как верхний (залежи ПЖЛ) и нижний (залежи льдов неизвестной природы) высокльдистые горизонты ледового комплекса. Верхний горизонт мощностью 5.4 м при УЭС = 8500 Ом·м залегает на глубине 7.1–12.5 м. С учетом действия известного принципа эквивалентности положение границ этого горизонта изменяется от 7.2–7.4 м с аномально высокими значениями УЭС = 390 000 Ом·м до 6.5–23.5 м с низкими значениями УЭС = 2900 Ом·м.

Второй вариант эквивалентности параметров верхнего горизонта обобщенного геоэлектрического разреза более достоверен, несмотря на низкие значения УЭС льдов⁷. Объективность этой оценки возрастает, учитывая данные метода ВЭЗ, полученные на Абалахской террасе Р.И. Коркиной. Согласно этим данным, верхняя часть ледового комплекса состоит из залежей ПЖЛ, залегающих в суглинках на двух интервалах глубин – 1.4–4.7 и 5–10 м [Коркина, 1949, с. 16]. Верхняя граница нижнего горизонта ледового комплекса в обобщенном геоэлектрическом разрезе залегает на глубине 36 м с УЭС = 65 800 Ом·м. Глубина залегания нижней границы его нижнего горизонта остается неизвестной.

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

В отличие от классификации типа геоэлектрического разреза по форме кривых ВЭЗ, применение кластерного анализа для решения этой задачи позволяет с позиции математической статистики более объективно оценить строение южной окраины ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья и точнее определить число ярусов льдов и глубину, на которой они залегают.

Объектами кластеризации были номера точек ВЭЗ, а переменными – параметры геоэлектрического разреза: тип, глубина залегания верхней гра-

ницы (кровли) и нижней границы (подошвы) высокоомных слоев, а также их мощность и УЭС. Отношение числа объектов к числу переменных более 10 удовлетворяет условию корректной кластеризации исходных данных. Эта задача решалась с помощью программы STADIA [Кулаичев, 2006, с. 350–365]. Перед кластеризацией исходная совокупность из 65 точек ВЭС была разделена на две области: с наличием и с отсутствием максимумов КС в верхней, средней и нижней частях кривых ВЭС.

По результатам кластеризации получена сводная описательная статистика параметров высокоомных слоев геоэлектрического разреза (табл. 1).

Для определения структуры геоэлектрического разреза его средние параметры были упорядочены в направлении роста глубины залегания кровли высокоомных слоев. Результат этой операции ранжирования приведен в табл. 2, а графики изменения средних значений глубин залегания границ и УЭС кластеров слоев (ярусов) приведены на рис. 6. Видно, что южная окраина ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья состоит из пяти ярусов, средняя мощность которых растет при увеличении глубины их залегания. В усредненных оценках с округлением до целого знака верхние три яруса ПЖЛ ледового комплекса залегают на глубинах: 1-й ярус – от 4–5 до 7–8 м (УЭС = 3500–4400 Ом·м); 2-й ярус – от 7–8 до

Таблица 1. Описательная статистика обобщенных параметров кластеров 1–5 высокоомных слоев геоэлектрического разреза

Статистика кластеров точек ВЭС	Кластер 1				Кластер 2				Кластер 3				Кластер 4		Кластер 5	
	M_1	M_2	H	УЭС	M_1	M_2	H	УЭС	M_1	M_2	H	УЭС	M_1	УЭС	M_1	УЭС
Среднее арифметическое (AP)	10.3	30.0	19.5	17310	7.6	27.7	21.0	4221	4.1	7.5	3.4	4427	18.7	2527	60.3	3068
Стандартная ошибка AP	1.4	4.5	3.9	4923	1.0	6.4	5.7	1448	0.5	0.7	0.3	640	1.4	276	12.0	975
Медианное среднее (ME)	9.9	26.5	14.0	7444	6.8	14.8	7.0	1952	4.6	8.1	3.1	3545	18.4	2272	53.5	2039
Модальное среднее	–	–	14.0	–	–	–	–	–	3.3	11.5	–	–	18.5	2972	–	–
Стандартное отклонение	4.8	15.7	13.4	17053	3.9	25.4	22.7	5792	2.2	3.1	1.2	2933	8.9	1743	34.0	2758
Минимум	4.6	10.1	5.5	357	2	0	0	364	0.8	1.9	1.1	499	4.3	134	25.5	816
Максимум	17.6	55.7	42.6	47086	14.8	68.6	56.7	21289	8.3	13.7	5.6	11539	50.6	6774	114.0	8505
Коэффициент вариации, %	46.3	52.2	68.6	98.5	51.3	91.7	108.0	137.2	53.6	41.3	35.3	66.2	47.6	69.0	56.5	90.0
Количество точек ВЭС	12	12	12	12	16	16	16	16	21	21	21	21	40	40	8	8
Уровень доверия AP 95 %	3.0	10.0	8.5	10835	2.1	13.5	12.1	3086	1.0	1.4	0.6	1334	2.8	557	28.5	2305

Примечание. M_1, M_2 – глубина залегания верхней и нижней границ высокоомных слоев разреза, м; H – мощность высокоомных слоев, м; УЭС – удельное электрическое сопротивление высокоомных слоев, Ом·м.

Таблица 2. Обобщенная структура геоэлектрического разреза и ледового комплекса по данным кластеризации точек ВЭС

Номер кластера	Номер яруса	Средние параметры обобщенных кластеров (ярусов)							
		M_1		M_2		H		УЭС	
		AP	ME	AP	ME	AP	ME	AP	ME
3	1	4.1	4.6	7.5	8.1	3.4	3.1	4427	3545
2	2	7.6	6.8	27.7	14.8	21.0	7.0	4221	1952
1	3	10.3	10.0	30.0	26.5	19.5	14.0	17300	7444
5	4	60.3	53.5	–	–	–	–	3068	2039
4	5	18.7	18.4	–	–	–	–	2527	2272

Примечание. M_1, M_2, H – глубина залегания верхней и нижней границы и мощность высокоомных слоев разреза (ярусов залежей льдов) соответственно, м; УЭС – удельное электрическое сопротивление, Ом·м; AP, ME – среднее арифметическое и медианное значение.

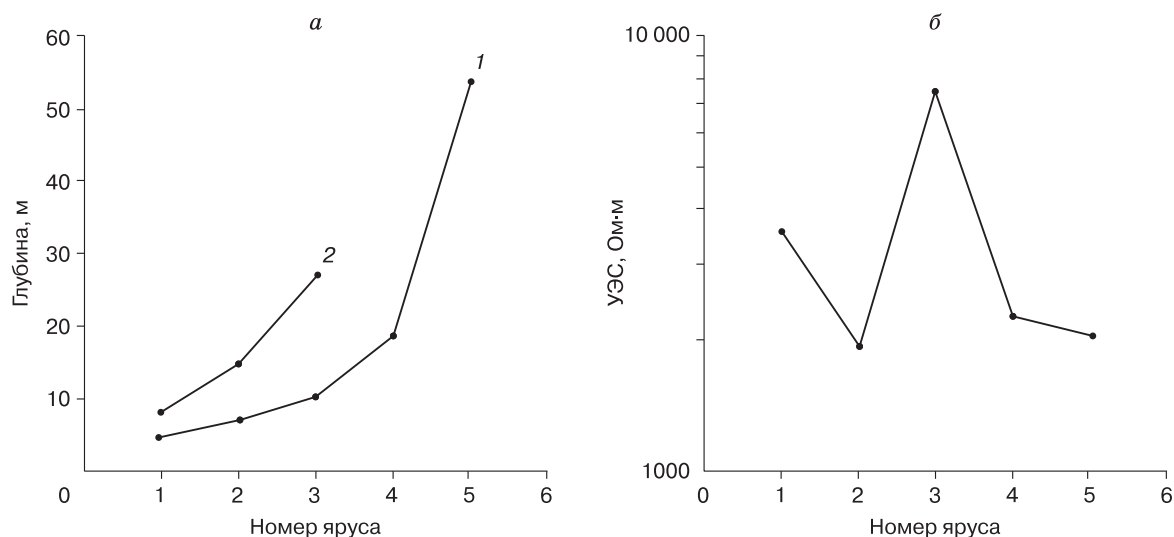


Рис. 6. Средние значения глубин залегания границ ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья (а) и УЭС высокоомных слоев геоэлектрического разреза (б) в ранжированном ряду номеров ярусов южной окраины комплекса.

1 – верхняя граница; 2 – нижняя граница.

15–20 м (УЭС = 1900–4200 Ом·м); 3-й ярус – от 10 до 27–30 м (УЭС = 7400–17 300 Ом·м).

Самые глубокие нижние 4-й и 5-й ярусы ископаемых льдов неизвестной природы залегают на 18–19 и 54–60 м при УЭС = 2000–3100 Ом·м. Глубина залегания их нижней границы не установлена ни бурением скважин, ни методом ВЭЗ. Остается невыясненной и природа ископаемых льдов, залегающих на большой глубине. Согласно исследованиям ИМЗ СО РАН, допускается возможность их сингенетического ледниково-фирнового происхождения с залеганием разобращенных горизонтов льда в виде пластово-горизонтальных структур⁸.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При обсуждении результатов исследований методом ВЭЗ, полученных на южной окраине ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья, возникло два главных вопроса: где находится южная граница ледового комплекса и какова его структура.

На первый вопрос ответ дан на основе совместного рассмотрения независимого фактического материала, полученного разными исследователями. С одной стороны, это материалы ландшафтного и геоморфологического районирования территории Лено-Амгинского междуречья, а с

другой – материалы методов ВЭЗ и ДЭМП.

Из анализа этих геолого-геофизических материалов следует, что граница выклинивания основной массы ископаемого льда в виде скопления залежей ПЖЛ и льдов иной природы в верхней и нижней частях ледового комплекса приурочена к вершине Эмильской террасы долины р. Лены (рис. 7, а)⁹.

Практически полное и резкое латеральное исчезновение ископаемого льда на 697-м км предвзывает постепенное снижение льдистости на всем участке работ и резкое снижение льдистости на 705-м км в верхней части ледового комплекса до глубины 20 м. Эти особенности обнаруживаются по трендам УЭС¹⁰ высокоомных слоев геоэлектрического разреза (см. рис. 7, б), а также по данным ДЭМП с информацией до глубины 10 м, т. е. до той части ледового комплекса, где залегают 1-й и 2-й ярусы залежей ПЖЛ (см. рис. 4).

По данным ландшафтно-геоморфологической съемки геокриологи проводят южную границу ледового комплекса в полосе проектируемой трассы железной дороги на стыке Маганской и Эмильской террас на 704-м километре, где заканчивается

⁸ На севере Лено-Амгинского междуречья с такими же, как и на участке исследования, отметками рельефа (220–250 м) фирновые льды разной степени кристаллизации погребены под ПЖЛ (2.5–5.0 м) на глубинах 12.0–17.0, 23.3–24.5, 33.6–39.0 м [Спектор и др., 2011].

⁹ На рис. 7, а даны номера точек ВЭЗ, расстояние между которыми равно 1 км. Номера точек ВЭЗ с расстоянием между ними 200 м не указаны из-за отсутствия места, но при необходимости их можно найти на разрезе КС (см. рис. 3, б).

¹⁰ До глубины 20 м средние значения УЭС на изученном участке распространения ледового комплекса уменьшаются в 4.6 раза, а до глубины 30–60 м – в 2.7 раза.

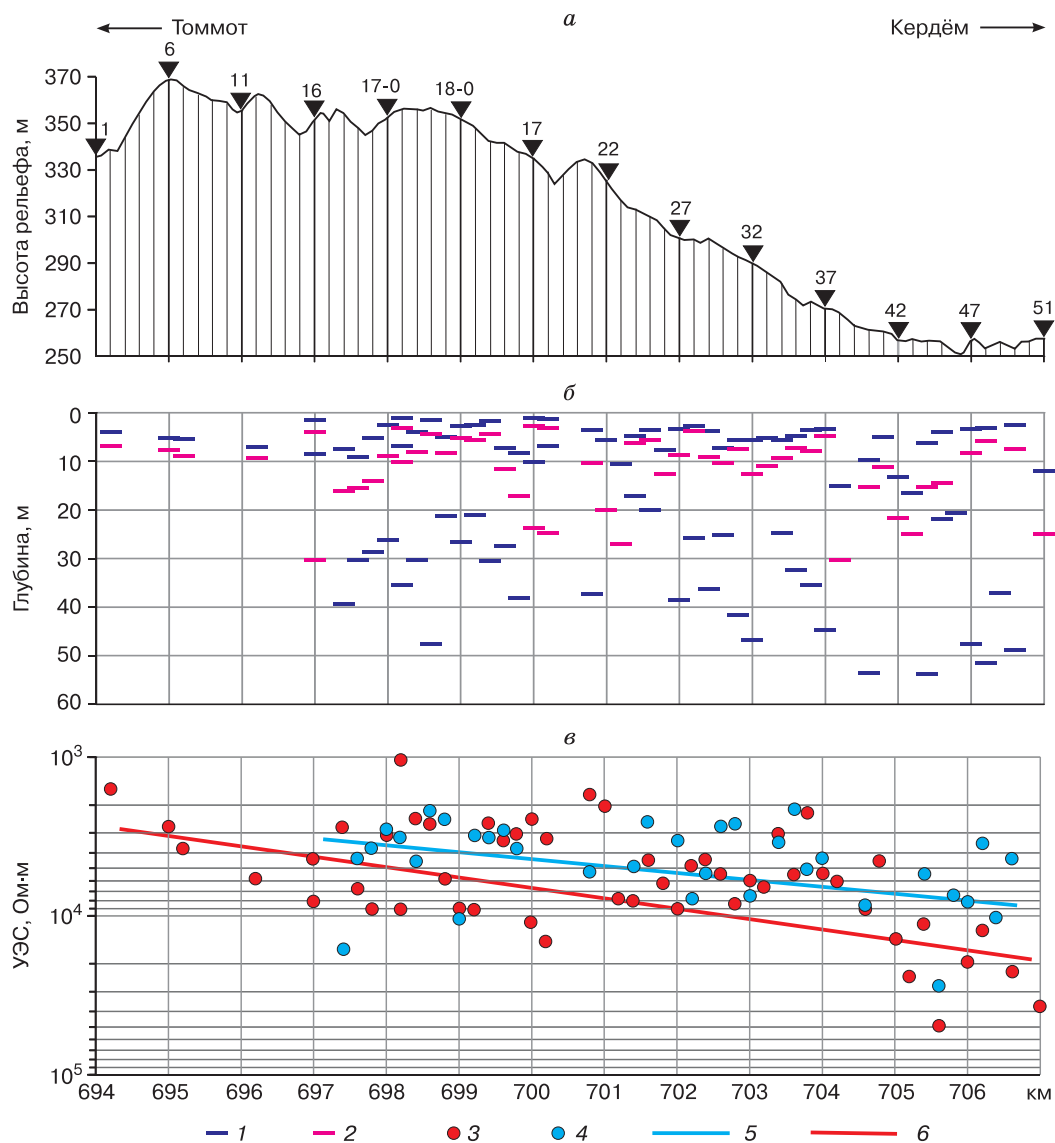


Рис. 7. Подземные льды в пределах южной окраины области распространения ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья.

а – рельеф на участке работ методом ВЭЗ (1–51 – номера точек ВЭЗ); б – поля точечного распределения глубины залегания верхних (1) и нижних (2) границ высокоомных слоев геоэлектрического разреза; в – УЭС высокоомных слоев, соответствующих 1–2-му ярусам залежей ПЖЛ на глубине 15–20 м (3) и 3–5-му ярусам ископаемых льдов на глубине 30–60 м (4); 5–6 – линии степенных трендов средних значений УЭС высокоомных слоев ледового комплекса до глубины 20 м (5) и ниже (6).

аласная провинция Центрально-Якутской низменности правобережья долины р. Лены (см. рис. 4). Если нет аласов, значит, в отличие от льдистой Маганской террасы, на Эмильской террасе залежей ископаемых льдов быть не может. Это решение геокриологов базируется на гипотезе о термокарстовом происхождении аласов с вытянутыми залежами ископаемых льдов. Однако полученные данные метода ВЭЗ не подтверждают эту гипотезу в рассмотренном случае, показывая, что

по признаку исчезновения аласов нельзя судить о полном исчезновении залежей ископаемых льдов в ледовом комплексе.

Несмотря на различие геокриологических и геофизических материалов, разница в оценке положения границы кардинального изменения (снижения) льдистости на 705-м км между данными ДЭМП, ВЭЗ и ландшафтно-геоморфологической съемки составляет 1 км. Такая незначительная разница свидетельствует об эффективности исполь-

зованных методов геофизики при решении задач разномасштабного инженерно-геологического и мерзлотного районирования в составе геолого-географических методов на осваиваемой территории Центрально-Якутской низменности, частью которой является Лено-Амгинское междуречье.

Вопрос о строении и мощности южной окраины ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья на исследуемом участке пересечения его проектируемой трассой железной дороги (694–707-й км) рассмотрим, сопоставляя результаты кластерного анализа точек ВЭЗ с данными буровых работ ЯПСЭ и разрозненными геокриологическими материалами.

Вначале следует обратить внимание на известную закономерность. На Лено-Амгинском междуречье это рост мощности ледового комплекса на общем фоне уменьшения мощности четвертичных и третичных отложений при переходе с низковысотной нельдистой Бестяхской террасы на средневысотные льдистые террасы (Тюнгюлюнскую, Абалахскую, Маганскую) правобережья долины р. Лены.

Мощность ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья геокриологи зачастую идентифицируют по положению в геологическом разрезе нижней границы общего горизонта льдистых отложений с включением в той или иной мере нерасчлененных на ярусы залежей ископаемых льдов. Такой общий подход, следующий из классической формулировки ледового комплекса П.А. Соловьева [1959, с. 49], был распространен в прошлом веке и сохранился до настоящего времени. Оценок мощности ледового комплекса в разных местах Лено-Амгинского междуречья сравнительно немного, и их сводка приведена ниже.

На севере Лено-Амгинского междуречья в верховьях р. Татты мощность ледового комплекса оценивается в 25 м [Иванов, Катасонов, 1973]. На этой же северной окраине междуречья в пределах нескольких физико-географических районов (Тюнгюлюнского, Абалахского, Присуольского, Притаттинского) мощность ледового комплекса оценивается в 15–30 и реже 40–50 м [Иванов, 1984]. По данным детальных геолого-геофизических исследований, выполненных ИМЗ СО РАН в 2005–2007 гг. на опытном полигоне Маганской террасы вдоль АЯМ на участке Томмот–Кердём, мощность ледового комплекса, залегающего до коренных пород (песчаников, известняков с прослоями глин), равна 28 м.

Н.П. Босиков [1991, с. 40] без ссылки на какой-либо источник сообщает, что на Тюнгюлюн-

ской и Абалахской террасах мощность ледового комплекса изменяется в диапазоне 10–50 и 30–60 м.

По П.А. Соловьеву [1959, с. 22, 26, 28], мощность ледового комплекса в толще озерно-аллювиальных суглинков Абалахской террасы изменяется от 15–20 до 40–60 м. Кроме того, П.А. Соловьев [1959, с. 50] приводит общие данные по параметрам залегания ледового комплекса всего Лено-Амгинского междуречья. В соответствии с ними, положение верхней границы ледового комплекса чаще всего находится на глубине 1.5–3.0 м с отклонением в меньшую (1.0–1.2 м) и большую (4–5 м) сторону. Положение нижней границы очень изменчиво, но обычно находится на глубине 9–12 м.

В целом мощность ледового комплекса невелика и приблизительно оценивается в 5–10 м. Однако, по данным бурения отдельных скважин и глубине вреза аласовых котловин, она может достигать 20–25 и 30–40 м.

Статистика вышеприведенных данных говорит о том, что для всего Лено-Амгинского междуречья мощность ледового комплекса распределена по вероятностному закону Гаусса¹¹ с разбросом единичных оценок в диапазоне 5–60 м со средним значением 30 ± 7.6 м на доверительном уровне 95 %.

Сравним полученные данные со статистикой обобщенных кластеров точек ВЭЗ по показателю медианного среднего – наиболее устойчивого к случайным аномальным “выбросам” на концах анализируемой совокупности данных. Из этого сравнения следует, что приведенные в литературе приблизительные оценки мощности удовлетворительно согласуются с оценками глубины залегания нижней границы 3-го яруса ПЖЛ ледового комплекса (см. табл. 2).

Сделаем еще одно сравнение по тому же показателю медианного среднего. Сопоставим результат кластерного анализа точек ВЭЗ с данными буровых работ ЯПСЭ. При этом сопоставлении для 1-го яруса ПЖЛ, залегающего в среднем на глубине 2–6 м, не находится пары в кластерах геоэлектрического разреза. Зато 2-й и 3-й ярусы ПЖЛ, залегающие по данным ЯПСЭ на 5–8 и 9–10 м, имеют пары из 3-го и 2-го кластеров (1-й и 2-й ярусы ПЖЛ, залегающих на 5–8 и 7–15 м). Причем 2-й ярус ПЖЛ в обобщенном представлении не только в точности залегает на 5–8 м, но и почти одинаково нечасто (с вероятностью 18 и 32 %) встречается в разрезе по данным ЯПСЭ и ВЭЗ. По 3-му ярусу также наблюдается близкое

¹¹ Интересно, что диапазон вероятностного распределения средней оценки мощности ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья включает частную оценку общей мощности ледового комплекса на юге Чукотки. Здесь в долине р. Майн в обнажении “Ледовый Обрыв” до самого уреза воды реки вскрыто четыре яруса ПЖЛ общей мощностью до 30 м [Котов, 1988].

согласие. Положение его обобщенных границ в ледовом комплексе по данным буровых работ ЯПСЭ и метода ВЭЗ оценивается в 8–10 и 7–15 м с вероятностью 5 и 25 %.

В пределах изученной южной окраины ледового комплекса отдельные фрагменты или их совокупность, а также в целом залежи ПЖЛ в обязательном обрамлении из льдогрунтов обнаруживаются методом точечного бурения скважин и объемным зондированием методом ВЭЗ на разной глубине с вероятностью порядка 40 и 70 %.

Итак, сопоставление материалов математической обработки кривых ВЭЗ, кластеризации и геологической интерпретации параметров геоэлектрического разреза с общими геологическими данными, полученными по Лено-Амгинскому междуручью, и частными инженерно-геологическими данными ЯПСЭ и ИМЗ СО РАН дает основание признать достоверными результаты работ методом ВЭЗ при изучении строения и мощности залежей ПЖЛ как по всему разрезу, так и в отдельных ярусах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований, полученные методом ВЭЗ на участке 694–707-го километров железной дороги Беркакит–Томмот–Якутск, свидетельствуют о ранее неизвестном многоярусном строении ископаемых льдов на южной окраине ледового комплекса Лено-Амгинского междуручья.

В структурном отношении по данным статистического кластерного анализа кривых ВЭЗ ледовый комплекс в обобщенном виде состоит из пяти ярусов. Верхняя и средняя части ледового комплекса сложены до глубины 20–30 м 1–3-м ярусами залежей ПЖЛ. Нижняя часть ледового комплекса представлена 4-м и 5-м ярусами ископаемых льдов неизвестной полигенетической природы, залегающих на глубине от 18–20 до 50–60 м.

Судя по значениям УЭС высокоомных слоев геоэлектрического разреза, наиболее насыщен подземным льдом (ПЖЛ) 3-й ярус ледового комплекса, залегающий в среднем на глубине 10–30 м.

Южная граница ледового комплекса с практически полным исчезновением ископаемых залежей ПЖЛ находится (по данным метода ВЭЗ) на 697-м км проектируемой трассы железной дороги. В этом месте находится глубокая ложбина на вершине Эмильской террасы. За ее пределами единичные залежи ПЖЛ встречаются до глубины не более 10 м, но их распространение (по данным буровых работ и данным ВЭЗ) носит неупорядоченный характер с вероятностью встречи около 0.1 %.

Из анализа динамики электрического сопротивления высокоомных слоев геоэлектрического разреза (данные ВЭЗ и ДЭМП) следует, что исчезновению ископаемых льдов предшествует рез-

кое снижение льдистости отложений на 705-м км железнодорожной трассы. По данным ландшафтно-геоморфологического районирования здесь происходит стык средневысотной сильнольдистой Маганской и существенно менее льдистой высокой Эмильской правобережных террас долины р. Лены. На стыке этих террас завершается аласодолнинная провинция Лено-Амгинского междуручья Центрально-Якутской низменности.

Разница в оценках положения границы между геофизическими данными и ландшафтно-геоморфологическим районированием невелика и составляет около 1 км. Методы ВЭЗ и ДЭМП предлагается использовать в составе геолого-географических методов с целью инженерно-геологического районирования и мерзлотной съемки на территории Центрально-Якутской низменности.

Литература

- Аболин Р.И.** Геоботаническое и почвенное описание Лено-Вилойской равнины. Л., Изд-во АН СССР, 1929, 372 с.
- Босиков Н.П.** Эволюция аласов в Центральной Якутии. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1991, 128 с.
- Варламов С.П., Скрыбин П.Н., Скачков Ю.Б., Шендер Н.И.** Геокриологические условия проектируемой железной дороги Томмот–Кердем на территории развития ледового комплекса // Наука и образование, 2006, № 4 (44), с. 78–83.
- ГОСТ 25100-2011.** Грунты. Классификация. М., Стандартинформ, 2018, 38 с.
- Граве Н.А.** Ископаемые льды водораздела Лены и Алдана // Тр. Ин-та мерзотоведения им. В.А. Обручева. М., 1944, т. 4, с. 10–32.
- Гриенко В.С., Камалетдинов В.А., Сластенов Ю.Л., Щербаков О.И.** Геологическое строение Большого Якутска // Региональная геология Якутии. Якутск, Изд-во Якут. ун-та, 1995, с. 3–20.
- Заборовский А.И.** Электроразведка. М., Гостоптехиздат, 1963, 429 с.
- Иванов М.С.** Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск, Наука, 1984, 125 с.
- Иванов М.С., Катасонов Е.М.** Криолитогенные отложения верховьев р. Татты (Центральная Якутия) // II Междунар. конф. по мерзотоведению. Докл. и сообщ. Якутск, 1973, вып. 2, с. 106–109.
- Инструкция** по электроразведке / Под ред. Г.С. Франтова. Л., Недра, 1984, 534 с.
- Калинин В.М.** Региональные закономерности поведения мощности мерзлых толщ / В.М. Калинин, В.С. Якупов. Якутск, ЯНЦ СО АН СССР, 1989, 144 с.
- Коркина Р.И.** Отчет по электрометрическим работам в Якутии / Фонды Ин-та мерзотоведения АН СССР. М., 1949, инв. № 454, 55 с.
- Котов А.Н.** Полифациальный комплекс позднелейстоценовых син- и эпикриогенных отложений долины р. Майн (Чукотка) // Проблемы геофизиологии. М., Наука, 1988, с. 108–115.
- Кулаичев А.П.** Методы и средства комплексного анализа данных. М., ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006, 512 с.
- Мельников В.П.** Электрофизические исследования мерзлых пород. Новосибирск, Наука, 1977, 108 с.

Мельников В.П., Нисковских Н.С. О типизации мерзлотно-геологических элементов по их электрохимической активности // Геокриологические и гидрогеологические исследования в Якутии. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1978, с. 58–65.

Мельников П.И. Мерзлотно-грунтовые условия строительства в Якутии // Фундаменты сооружений на мерзлых грунтах в Якутии. М., Наука, 1968, с. 5–19.

Нерадовский Л.Г. Изучение ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья // Геоэкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология, 2008, № 5, с. 460–467.

Руководство пользователя. Программа IPI2Win (версия 2). М., 2001, 22 с.

Светов Б.С., Бердичевский М.Н. Электроразведка на современном этапе // Геофизика, 1998, № 2, с. 4–11.

Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М., Изд-во АН СССР, 1959, 144 с.

Спектор В.Б., Спектор В.В., Бакулина Н.Т. Погребенные снежники на Лено-Амгинской равнине // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 18–24.

Электроразведка методом сопротивлений / Под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина. М., Изд-во Моск. ун-та, 1994, 246 с.

Якубовский Ю.В. Электроразведка / Ю.В. Якубовский, Л.Л. Ляхов. М., Недра, 1988, 390 с.

References

Abolin R.I. Geobotanicheskoe i pochvennoe opisanie Leno-Vilyuskoj ravniny [Geobotany and Soils of the Lena-Vilyuy Plain]. Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1929, 372 p. (in Russian).

Bosikov N.P. Evolyutsia alasov v Tsentralnoi Yakutii [Evolution of Alases in Central Yakutia]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1991, 128 p. (in Russian).

Varlamov S.P., Skryabin P.N., Skachkov Y.B., Shender N.I. Geocryological conditions in icy permafrost terrain along the proposed Tommot-Kerdem Railway. Nauka i Obrazovanie, 2006, No. 4 (44), p. 78–83 (in Russian).

GOST 25100-2011. Soils. Classification. Moscow, Standartinform, 2018, 38 p.

Grave N.A. Ground ice of the Lena and Aldan watershed. In: Trudy Instituta Merzlotovedeniya [Proc. of Obruchev Permafrost Research Institute]. Moscow, 1944, vol. 4, p. 10–32 (in Russian).

Grinenko V.S., Kamaletdinov V.A., Slastenov Yu.L., Shcherbakov O.I. Geological structure of the Bolshoy Yakutsk. In: Regionalnaya geologiya Yakutii [Regional Geology of Yakutia]. Yakutsk, Yakutsk University Press, 1995, p. 3–20 (in Russian).

Zaborovskiy A.I. Elektrorazvedka [Electrical prospecting]. Moscow, Gostoptekhizdat, 1963, 429 p. (in Russian).

Ivanov M.S. Kriogennoe stroenie chetvertichnykh otlozhenii Leno-Aldanskoj vpadiny [Cryogenic Structure of Quaternary Deposits of the Lena-Aldan depression]. Novosibirsk, Nauka, 1984, 125 p. (in Russian).

Ivanov M.S., Katasonov E.M. Cryolithogenous deposits of the upper reaches of the Tatta River (Central Yakutia). In: II Intern. Conf. on Permafrost. Papers and Presentations. Yakutsk, 1973, vol. 2, p. 106–109 (in Russian).

Frantov G.S. (Ed.). Instruksiya po elektrorazvedke [Electrical prospecting: A practical guide]. Leningrad, Nedra, 1984, 534 p. (in Russian).

Kalinin V.M., Yakupov V.S. Regionalnye zakonomernosti povedeniya moshchnosti merzlykh tolshch [Regional Normal Behavior Thickness of Permafrost]. Yakutsk, YaNTs SO AN SSSR, 1989, 144 p. (in Russian).

Korkina R.I. Report on electrometric studies in Yakutia. In: Unpublished Reports, Permafrost Institute AS USSR. Moscow, 1949, Cat. No. 454, 55 p. (in Russian).

Kotov A.N. Multi-facies complex of Late Pleistocene syn- and epicryogenic deposits of the Mayn River Valley (Chukchi Peninsula). In: Problemy Geokriologii [Problems of Geocryology]. Moscow, Nauka, 1988, p. 108–115 (in Russian).

Kulaichev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh [Methods and Tools for Integrated Data Analysis]. Moscow, FORUM: INFRA-M, 2006, 512 p. (in Russian).

Melnikov V.P. Elektrofizicheskie issledovaniya merzlykh porod [Electrophysical Investigations of Frozen Ground]. Novosibirsk, Nauka, 1977, 108 p. (in Russian).

Melnikov V.P., Niskovskikh N.S. On classification of permafrost-geological elements from their electrochemical activity. In: Geokriologicheskie i gidrogeologicheskie issledovaniya v Yakutii [Geocryological and Hydrogeological Investigations in Yakutia]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1978, p. 58–65 (in Russian).

Melnikov P.I. Permafrost conditions for construction in Yakutia. In: Fundamenty sooruzhenii na merzlykh gruntakh v Yakutii [Building Foundations on Permafrost in Yakutia]. Moscow, Nauka, 1968, p. 5–19 (in Russian).

Neradovskii L.G. The study of Ice Complex at the Lena-Amga interfluvium. Geoekologiya, Inzhenernaya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya, 2008, No. 5, p. 460–467 (in Russian).

IPI2Win Software (ver. 2). User Manual. Moscow, 2001, 22 p. (in Russian).

Svetov B.S., Berdichevskii M.N. Electrical geophysical prospecting methods at the present stage. Geofizika, 1998, No. 2, p. 4–11 (in Russian).

Soloviev P.A. Kriolitozona severnoi chasti Leno-Amginskogo mezhdurechiya [Permafrost in the Northern Part of the Lena-Amga Watershed]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1959, 144 p. (in Russian).

Spektor V.B., Spektor V.V., Bakulina N.T. Buried snow in the Lena-Amga Plain. Earth's Cryosphere, 2011, vol. XV, No. 4, p. 16–20.

Khmelevskiy V.K., Shevnin V.A. (Ed.). Elektrorazvedka metodom soprotivlenii [Electrical Prospecting using Resistivity Methods]. Moscow, Moscow University Press, 1994, 246 p.

Yakubovskiy Y.V., Lyakhov L.L. Elektrorazvedka [Electrical Prospecting]. Moscow, Nedra, 1988, 390 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 22 марта 2018 г.,
после доработки – 12 декабря 2018 г.,
принята к публикации 22 апреля 2019 г.*