

Количественная оценка объёмной льдистости мёрзлых грунтов методом дипольного электромагнитного профилирования

© 2018 г. Л.Г. Нерадовский

Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

leoner@mpi.ysn.ru

Quantitative estimation of volumetric ice content in frozen ground by dipole electromagnetic profiling method

L.G. Neradovskiy

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

leoner@mpi.ysn.ru

Received March 15, 2017

Accepted August 8, 2017

Keywords: *dipole electromagnetic profiling, HFMD field amplitude attenuation parameter, layer of annual temperature fluctuations, permafrost, volumetric ice content.*

Summary

Volumetric estimation of the ice content in frozen soils is known as one of the main problems in the engineering geocryology and the permafrost geophysics. A new way to use the known method of dipole electromagnetic profiling for the quantitative estimation of the volumetric ice content in frozen soils is discussed. Investigations of foundation of the railroad in Yakutia (i.e. in the permafrost zone) were used as an example for this new approach. Unlike the conventional way, in which the permafrost is investigated by its resistivity and constructing of geo-electrical cross-sections, the new approach is aimed at the study of the dynamics of the process of attenuation in the layer of annual heat cycle in the field of high-frequency vertical magnetic dipole. This task is simplified if not all the characteristics of the polarization ellipse are measured but the only one which is the vertical component of the dipole field and can be the most easily measured. Collected data of the measurements were used to analyze the computational errors of the average values of the volumetric ice content from the amplitude attenuation of the vertical component of the dipole field. Note that the volumetric ice content is very important for construction. It is shown that usually the relative error of computation of this characteristic of a frozen soil does not exceed 20% if the works are performed by the above procedure using the key-site methodology. This level of accuracy meets requirements of the design-and-survey works for quick, inexpensive, and environmentally friendly zoning of built-up remote and sparsely populated territories of the Russian permafrost zone according to a category of a degree of the ice content in frozen foundations of engineering constructions.

Citation: Neradovskiy L.G. Quantitative estimation of volumetric ice content in frozen ground by dipole electromagnetic profiling method. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018. 58 (1): 94–104. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-94-104

Поступила 15 марта 2017 г.

Принята к печати 8 августа 2017 г.

Ключевые слова: *метод ДЭМП, мёрзлые грунты, объёмная льдистость, параметр амплитудного ослабления поля ВВМД, разнос, слой годовых теплооборотов.*

На примере исследований основания железнодорожной трассы в криолитозоне Якутии предложен новый подход в применении известного метода дипольного электромагнитного профилирования для количественной оценки объёмной льдистости мёрзлых грунтов. Решение этой задачи максимально упрощено за счёт измерений только одной характеристики – вертикальной составляющей поля высокочастотного вертикального магнитного диполя.

Введение

Изучение льдистости мёрзлых грунтов — одно из главных направлений развития и применения методов геоэлектрики на постоянном и переменном токе в области инженерной геокриологии. Таким оно остаётся и в настоящее время

небывалого по интенсивности освоения природных богатств Восточной Сибири и Дальнего Востока. Проблема изучения мёрзлых грунтов в этих условиях заключена в оптимизации таких геолого-экономических показателей проектно-изыскательских работ, как высокая производительность, низкая себестоимость, геокрио-

логическая информативность и экологическая чистота. Один из подходящих экономичных и простых методов, прошедший в 1970–90-х годах всестороннюю производственную апробацию в криолитозоне Якутии, Красноярского края и Магаданской области, — метод дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП). По сравнению с аналогом дипольного профилирования на постоянном токе, требующем для полевых измерений отряд из 6–7 человек, при использовании этого метода необходимы только два человека. При изучении мёрзлых грунтов до глубины 10–100 м методом ДЭМП используется лёгкая и сравнительно портативная аппаратура массой не более 10 кг, которая может работать в течение одной–двух недель от одного сменного комплекта обычных круглых батареек.

Традиционная геокриологическая задача изучения методом ДЭМП границ распространения по площади подземных льдов и льдистых грунтов сводится к нерасчленённому изучению этих сложных по конфигурации природных образований. Такой подход в первую очередь предусматривает необходимость знания общей льдистости слоя годовых теплооборотов, где происходят механическое и физико-химическое взаимодействия мёрзлых грунтов с фундаментами инженерных сооружений. Именно поэтому не вся толща мерзлоты мощностью в несколько сотен метров, а этот небольшой по мощности слой (чаще всего 10–20 м), доступный для изучения неглубокими скважинами, интересен геокриологам и геофизикам.

Цель настоящей работы — показать, каким образом, изучая методом ДЭМП процесс затухания гармонического поля высокочастотного вертикального магнитного точечного диполя (ВВМД), удаётся выйти на количественную оценку в слое годовых теплооборотов показателя средней объёмной льдистости мёрзлых грунтов. Новизна такого подхода к решению этой важнейшей научно-практической задачи видна в сравнении с традиционным подходом. В нём, как известно, упор делается на изучение льдистости мёрзлых грунтов по их электрическому сопротивлению (далее — сопротивлению) на постоянном или переменном токе [1, 2].

Первый эксперимент по обозначенной тематике петрофизических исследований выполнен в 2006 г. в пределах Центрально-Якутской

равнины на Лено-Амгинском междуречье, где проектировалось строительство участка железнодорожной трассы (далее — трасса ж/д) «Берка-Томмот–Якутск» между станциями Томмот и Нижний Бестях. Выполненный эксперимент позволил установить, что эффективное сопротивление мёрзлых дисперсных грунтов, составляющих основание трассы железной дороги, оценённое по отношению амплитуд вертикальной и горизонтальной составляющих поля ВВМД (H_z/H_r), зависит от средней объёмной льдистости слоя годовых теплооборотов [3, 4]. Положительные результаты эксперимента инициировали дальнейшие исследования методом ДЭМП по той же железнодорожной трассе, но уже с акцентом на изучение влияния объёмной льдистости на затухание поля ВВМД в слое годовых теплооборотов. Первые опыты в этом новом направлении петрофизических исследований показали, что, с точки зрения оптимизации показателей производительности и информативности, достаточно ограничиться измерением одной наиболее информативной в геокриологическом отношении и менее зависимой от помех характеристики, а именно, вертикальной составляющей эллипса поляризации поля ВВМД (H_z) [5].

Район исследований

Исследования выполнялись летом 2008 г. Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН по заказу ОАО «Проекттрансстрой» для научного сопровождения инженерно-геокриологических изысканий на ледовом комплексе Лено-Амгинского междуречья — потенциально опасном для будущей эксплуатации трассы железной дороги на участке длиной около 45 км. В работе П.А. Соловьёва это природное образование рассматривается как «особый горизонт, насыщенный жилами льда, более или менее единый и плащеобразно залегающий на обширных участках Центрально-Якутской равнины, но неоднородный по возрасту, составу, генезису и мощности» [6, с. 49]. По данным П.И. Мельникова [7], впервые выполнившего для всей территории криолитозоны Якутии мелкомасштабное районирование по мерзлотно-грунтовым условиям строительства и эксплуатации зданий и сооружений, Центрально-Якутская равнина

занимает северную часть Лено-Алданского и северо-восточную часть Лено-Вилюйского междуречий, где развита толща мёрзлых четвертичных отложений озёрно-аллювиального генезиса со средней мощностью около 25 м.

Наиболее изучена в производственном и научном отношении северная часть Лено-Алданского междуречья в пределах Лено-Амгинского водораздельного пространства. Здесь разрез ледового комплекса сложен преимущественно льдистыми грунтами глинистого состава (пылевато-илистыми и супесчано-суглинистыми фракциями). В них находятся многочисленные залежи древних подземных льдов повторно-жильного генезиса (далее льды) со сложной конфигурацией границ по площади и глубине. Залежи погребены на глубине от 3–5 до 10–30 м. По этой причине они не проявляют себя на дневной поверхности в отличие от молодых льдов, образующихся на обширных приморских равнинах Субарктики, границы которых легко визуальным картируются по полигонально-жильным трещинным структурам.

Высокая насыщенность слоя годовых теплооборотов льдогрунтами (по ГОСТ 25100–95 [8], это – грунты с показателем содержания видимых по керну скважин ледяных включений $I_i > 0,4$) и льдами установлена бурением скважин и методом ДЭМП на высоких Маганской и Аба-лахской террасах долины р. Лена [4]. Здесь мёрзлые грунты отличаются сложностью строения, непостоянством состава и высокой изменчивостью объёмной льдистости мёрзлых грунтов. В понижениях рельефа, представленных озёрно-аласовыми котловинами, грунты, как правило, представлены засоленными гумусированными супесями, суглинками, илами. Возвышенные формы рельефа (межаласья) сложены серыми льдистыми пылеватыми супесями и лёссовидными суглинками, которые служат материнской средой для льдов. При переходе на самую низкую террасу (Бестяхскую) льды в грунтах появляются очень редко, а сами грунты постепенно сменяются на однородную по гранулометрическому составу толщу мёрзлых нельдистых песков эолово-аллювиального генезиса с незначительной влажностью (не более 10–15%) и высокой температурой, близкой к 0 °С.

Редко наблюдаемые на Лено-Амгинском междуречье условия залегания залежей льдов в

глинистых грунтах ледового комплекса иллюстрирует рис. 1. На рис. 1, а показан общий план полосы искусственного обнажения трёх залежей льдов, обозначенных индексами 1–3. Внизу (см. рис. 1, б) этот участок уже занят жидкообразной массой глинистого материала, которая образовалась при вытаивании льдов, льдистых грунтов и ограничивает подход к обнажению и детальному его обследованию. На рис. 1, б показаны увеличенные фрагменты отдельных залежей льдов с вертикальной полосчатой структурой, указывающей на их повторно-жильное происхождение. Тёмно-голубоватый с коричневым оттенком цвет льдов показывает присутствие в них примесей илистого и глинистого материала из вмещающей грунтовой среды.

Методика исследований

Главные технологические параметры проведения работ методом ДЭМП – частота, разнос (расстояние между точками излучения и измерения поля ВВМД) и положение точки записи результатов измерений. Пункт 3.3.7.4 общей инструкции по электроразведке [9, с. 99] рекомендует для заданной глубины изучения мёрзлых грунтов находить частоту и разнос как теоретическим, так и эмпирическим путём. В рассматриваемом случае мёрзлые грунты необходимо было изучить до глубины бурения скважин, т.е. 10 м. Для этого теоретический путь выбора разносов предусматривал расчёты комплексного волнового числа для разных частот и известных значений удельного эффективного сопротивления и диэлектрической проницаемости мёрзлых грунтов. Эмпирический путь выбора частоты и разноса выполнялся по данным метода дистанционного электромагнитного зондирования (ДЗ) на участках железнодорожной трассы с известным строением мёрзлых грунтов, т.е. в точках скважин. Однако получить такие оценки, соответствующие на Лено-Амгинском междуречье глубине изучения мёрзлых грунтов до 10 м, довольно трудно из-за отсутствия опорных литолого-фациальных границ с постепенным замещением по глубине глинистых грунтов на песчаные. Тем не менее, сравнивая данные методов ДЗ и геотермии в точках скважин и анализируя по этим данным динамику реакции слоя годо-

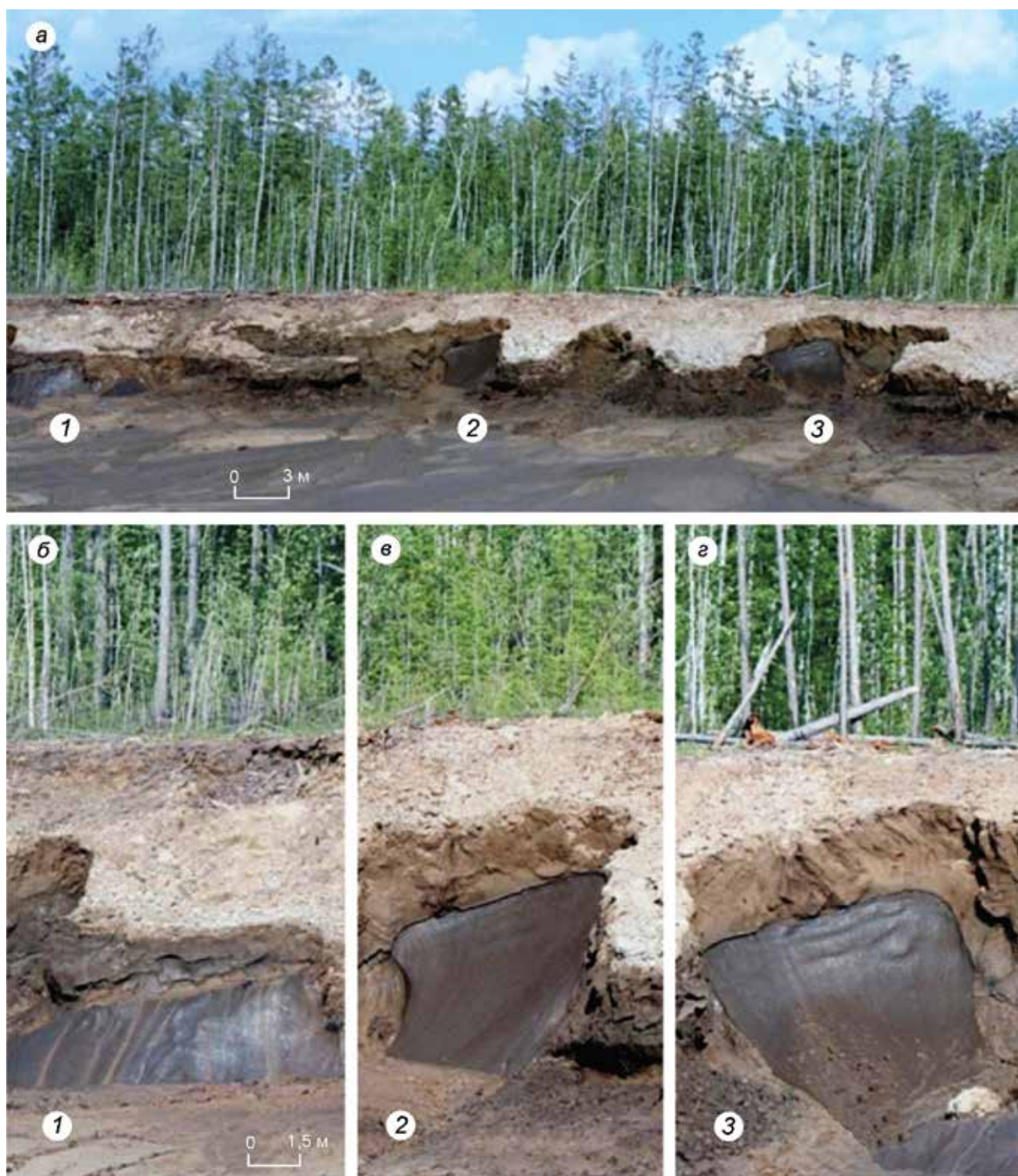


Рис. 1. Полоса вскрытия в 2014 г. строительными работами верхней части ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья в районе пос. Качикатцы (участок реконструкции на 130-м километре автомагистрали М-59: г. Якутск – г. Тында). Фото Л.Г. Нерадовского.

Пояснения см. текст

Fig. 1. The upper part of the ice complex exposed by construction activities in 2014 near Kachikatsy, Lena-Amga watershed (M-59 Yakutsk-Tynda Highway section under reconstruction, KM 130). Photo by L.G. Neradovskiy.

Explanation see text

вых теплооборотов на электромагнитное и тепловое возбуждение с поверхности Земли, удаётся решить задачу выбора частоты и разноса для требуемой глубины изучения мёрзлых грунтов.

Многолетний опыт работ методами ДЭМП и ДЗ в сплошной криолитозоне Центральной Якутии показывает, что в большинстве случаев частота 1,125 МГц и разнос 50 м обеспечивают изучение мёрзлых грунтов до глубины 10 м [10]. При этом частота 1,125 МГц не уступает частоте 2,250 МГц по высокой чувствительности затухания поля ВВМД к изменению состава, состояния и свойств мёрзлых грунтов в слое годовых теплооборотов. Рассмотрим, насколько отличаются найденные эмпирическим путём оценки разноса для частоты 1,125 МГц от теоретических оценок. Предварительно вычислим мощность скин-слоя или, иначе говоря, глубину эффективного проникновения электромагнитного поля по одной из хорошо известных в теории электродинамики сплошных сред формуле:

$$h_s = \sqrt{2 / [k]}, \quad (1)$$

где k — модуль комплексного волнового числа, м^{-1} .

Вычисления модуля k проведём для усреднённых геоэлектрических условий слоя годовых теплооборотов криолитозоны Центрально-Якутской равнины [11], т.е. используем чаще всего встречающиеся на этой территории вероятностные значения удельного эффективного сопротивления (437–853 омметра) и вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости (5,7–9,5 отн. ед.) мёрзлых грунтов песчано-глинистого состава. Для этих значений модуль k равен 0,145 и 0,104 м^{-1} и соответственно скин-глубина в глинистых и песчаных грунтах составляет 9,8 и 13,6 м.

Исследования В.С. Титлинова и Р.Б. Журавлёвой [5, с. 15] позволяют по скин-глубине и параметру P (произведение модуля k на разнос) найти теоретическую оценку разносов. Так, разносы 10 и 30 м, принятые на основании практического опыта работ методом ДЭМП и соответствующие им значения P (1,0–1,5 и 3,1–4,3), теоретически обеспечивают 60 и 80% скин-глубины. Это соответствует глубине изучения мёрзлых грунтов в среднем приблизительно до 7–9 м. Таким образом, вычисленная теоретическая оценка разноса 30 м и ранее найденная эмпирическая оценка разноса 50 м близки между

собой по глубине изучения слоя годовых теплооборотов до 10 м.

С учётом близости теоретических и опытных оценок эффективной глубины проникновения поля ВВМД получает обоснование применение формулы (2) (см. далее) не только для идеальной модели однородного изотропного нижнего полупространства, но и для реальной модели мёрзлой неоднородной и анизотропной грунтовой среды в диапазоне частот 0,281–2,250 МГц. В идеальной модели в простейших условиях дальней зоны ($P \gg 1$) с вертикально падающей плоской электромагнитной волной на горизонтальную поверхность Земли, а в реальной модели — в промежуточной зоне разносов от 3–5 до 50–100 м, где нет волнового процесса, условия изучения поля ВВМД весьма сложны.

Методика изучения методом ДЭМП процесса затухания поля ВВМД в слое годовых теплооборотов состоит в следующем. Вблизи точки скважины излучающая антенна устанавливается в горизонтальном положении на высоте около 1 м от поверхности. На этой же высоте и в таком же положении располагается приёмная антенна. Подключённая к микровольtmетру, измеряющему амплитуду поля H_z , эта антенна перемещается в заданном направлении от излучающей антенны на расстояние 10 и 30 м. Эту методику ранее применял М.И. Задегиголова, но с иной целью, а именно, для устранения из данных метода ДЭМП фона нормального поля ВВМД [12, с. 199].

Излучающая антенна, подключённая к генератору переменного тока, работает на какой-либо одной фиксированной частоте (в рассматриваемом случае на частоте 1,125 МГц) и излучает по вертикальной оси в верхнее и нижнее полупространство электромагнитное поле. В итоге на границе этих полупространств, т.е. на поверхности Земли, измеряется суммарное первичное и вторичное поле, действующее на приёмную антенну. Первичное поле действует как помеха в верхнем полупространстве, оказывая искажающее экранирующее влияние на результат измерений амплитуды H_z . Вторичное поле действует со стороны нижнего полупространства и представляет собой результат генерации первичным полем токов вихревой и поляризационной природы, возникающих в межфазовом пространстве мёрзлых грунтов.

Измерение H_z на частоте 1,125 МГц выполняется аппаратурой «СЭМЗ» в четырёх азимутах по

оси и поперёк трассы ж/д [13, 14]. Эта техника со стрелочной индикацией измерений также позволяет работать методом ДЭМП на частотах 0,281; 0,562 и 2,250 МГц. Причём не только в благоприятные по климатическим условиям летне-осенние периоды, но и зимой при температуре до -30°C .

Мера объёмного затухания поля ВВМД в слое годовых теплооборотов оценивалась в окрестности точек скважин в радиусе 30 м по усреднённому в четырёх азимутах параметру амплитудного ослабления G :

$$G = \left[\sum_{i=1}^4 G_i \right] / 4; \quad G_i = 20 \log \left(\frac{A_1}{A_2} \right) / (d_2 - d_1), \quad (2)$$

где G_i — частные значения параметра амплитудного ослабления (дБ/м), соответствующие номеру азимута $i = 1, 2, 3, 4$; A_1 и A_2 — значения амплитуд характеристики H_z (мкВ), измеренные на разностях $d_1 = 10$ и $d_2 = 30$ м.

В отличие от теоретического коэффициента затухания, зависящего только от частоты и базовых характеристик электрических свойств мёрзлых грунтов (сопротивления, диэлектрической и магнитной проницаемости), эмпирический параметр G дополнительно зависит от применяемой техники и методики измерений. Интегральный по природе и содержащий в себе неразделяемый результат влияния первичного и вторичного полей ВВМД на амплитуду H_z этот параметр, в отличие от метода межскважинного радиоволнового просвечивания, не позволяет изучать процесс теплового поглощения электромагнитной энергии мёрзлыми грунтами. В этом — главный недостаток параметра G , реализуемого в методах ДЭМП и ДЗ. Другой существенный недостаток параметра G обусловлен принципиальным ограничением точного контроля глубины изучения мёрзлых грунтов. Впрочем, этот недостаток присущ не только методам ДЭМП и ДЗ, но и другим индуктивным методам. Поэтому из-за невозможности точной привязки результатов измерений к глубине изучения слоя годовых теплооборотов параметр G всегда несёт в себе элемент геологической неопределённости.

К преимуществам параметра G относятся: 1) лёгкость измерений; 2) простота количественной оценки; 2) достаточная для практики точность количественной оценки усреднённых показателей свойств мёрзлых грунтов. Главная же ценность параметра G , зависящего от сопротив-

ления и диэлектрической проницаемости, на качественно ином уровне в обобщённом виде наследовать и передавать от этих характеристик всю информацию о протекающих в мёрзлых грунтах механических и физико-химических процессах. Следовательно, параметр G содержит в себе пусть не вполне точный, но куда более важный по достоверности итоговый результат суммарного действия этих процессов, позволяя получить данные о составе, состоянии и свойствах мёрзлых грунтов [10].

Результат изучения по параметру G процесса затухания поля ВВМД по аналогии с методом ДЗ [15, с. 23] относится к точке нахождения неподвижной излучающей антенны. Заметим, что если бы решалась типовая задача геоэлектрики с построением геоэлектрического разреза, то результат вычислений значений эффективного сопротивления следовало бы относить к середине между удаляющимися друг от друга на равное расстояние приёмно-передающими антеннами, как это делается в методах вертикального электрического зондирования и электропрофилирования на постоянном токе. В этих методах результат вычисления кажущегося сопротивления относится к середине расстояния между заземлёнными в грунт приёмными и питающими электродами [9, с. 102].

Контроль измерений характеристики H_z , сделанный в объёме 16,8% общего числа изученных методом ДЭМП скважин, показал, что относительная точность вычислений параметра G изменялась от 0,4 до 7,9% при среднем значении 3,2%. Снижение точности, как правило, наблюдалось на участках сосредоточения залежей льдов с высокой дисперсией (разбросом) частных азимутальных значений G_i . Такой статистический признак рекомендуется в дальнейшем использовать для надёжной идентификации присутствия в мёрзлых грунтах скоплений залежей льдов. Полученные в четырёх азимутах средние значения параметра G сравнивались со средними значениями объёмной льдистости мёрзлых грунтов, определяемой по лабораторным данным по формуле И.Н. Вотякова [16, с. 19]

$$W_{ob} = \gamma_{ск} W_{tot} / 0,9, \quad (3)$$

где $\gamma_{ск}$ — объёмная масса скелета мёрзлого грунта, г/см³; W_{tot} — средневзвешенная по всему изученному слою годовых теплооборотов суммар-

ная весовая влажность, доли ед.; 0,9 — значение объёмной массы льда, г/см³.

Строго говоря, результаты лабораторных определений объёмной льдистости и параметра G нельзя сравнивать между собой, так как они несут разномасштабную точечную и объёмную информацию об изучаемой льдистости массива мёрзлых грунтов. Даже если допустить, что между этими характеристиками потенциально существует функциональная зависимость, то она может быть полностью скрытой и ненаблюдаемой при неравномерном распределении льдистости в окрестностях скважины. Действительно, если скважина случайно окажется пробуренной в промежутке между залежами подземных льдов, то результат лабораторного анализа в этой точке покажет низкую льдистость мёрзлых грунтов. Напротив, результат определения параметра G с низкими средними значениями затухания поля ВВМД в окрестностях скважины укажет на высокую льдистость мёрзлых грунтов. Сочетаний таких вариантов точечных и объёмных оценок льдистости множество, и все они заведомо затрудняют изучение петрофизических закономерностей. Однако другого пути, кроме сравнения результатов лабораторного изучения проб грунтов и наземного или скважинного изучения геофизических полей, не существует и с этим необходимо считаться при постановке натурных экспериментов.

Методика исследований методом ДЭМП процесса затухания поля ВВМД в слое годовых теплооборотов в зависимости от объёмной льдистости мёрзлых грунтов завершалась решением прямой и обратной петрофизических задач с помощью программы «Stadia» [17]. Прямая задача предусматривала изучение корреляционной связи зависимой геофизической переменной (параметра G) с независимой геологической переменной (объёмной льдистости). Обратная задача решалась по уравнениям регрессии и заключалась в вычислении средних значений объёмной льдистости по значениям G .

Обсуждение результатов

Фактический материал исследований включал в себя 75 определений парных значений G и W_{ob} . Статистический разведочный анализ позволил установить неоднородность вероятностных рас-

Таблица 1. Статистика фактического материала

Описательная статистика	ПК6990-ПК7100		ПК7250-ПК7360	
	W_{ob}	G	W_{ob}	G
Среднее арифметическое	0,456	2,47	0,438	2,20
Среднее медианное	0,450	2,51	0,440	2,15
Среднее модальное	0,430	2,03	0,440	2,07
Стандартное отклонение	0,076	0,47	0,057	0,52
Минимальное значение	0,308	1,27	0,310	1,12
Максимальное значение	0,630	3,42	0,560	3,17
Число определений	46	46	29	29
Уровень надёжности 95%	0,023	0,14	0,021	0,20

пределений значений этих геолого-геофизических характеристик, нивелирующую между ними реально существующую корреляционную связь. Именно поэтому фактический материал был разбит на две однородные группы по признаку состава грунтов. В первую группу вошли 46 парных значений G и W_{ob} , полученных на участке трассы ж/д ПК6990-ПК7100, где распространены глинистые грунты в виде лёссовидных суглинков. Вторую группу составили 29 парных значений G и W_{ob} , собранных на участке трассы железной дороги ПК7250-ПК7360 с преимущественно распространёнными песчаными грунтами.

Описательная статистика (табл. 1) показывает, что в обеих группах объёмная льдистость грунтов разного состава изменяется практически одинаково: в диапазоне 0,308–0,630 доли ед. при среднем значении около $0,440 \pm 0,022$ доли ед. Этой динамике следуют значения параметра G , распределённые в интервале 1,12–3,42 дБ/м с разными средними значениями. Причём, если брать медианную среднюю метрику, более устойчивую к изменению на краях выборочной совокупности минимальных и максимальных значений, то в глинистых грунтах затухание поля ВВМД выше ($G = 2,51$ дБ/м), а в песчаных грунтах — ниже ($G = 2,15$ дБ/м). Относительная разница затухания незначительна (15,4%), но все же указывает на более сильное влияние фактора дисперсности мёрзлых грунтов, которое нельзя игнорировать при изучении процесса затухания поля ВВМД в зависимости от объёмной льдистости. Форма этой зависимости показана на рис. 2, из которого видно, что рост объёмной льдистости приводит через рост сопротивления и снижения диэлектрической проницаемости мёрзлых грунтов к нелинейному уменьшению параметра G . Однако темп снижения разный и регулиру-

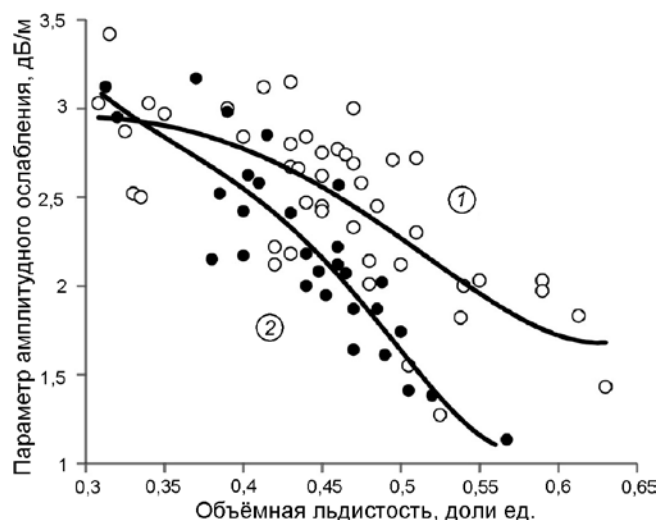


Рис. 2. Графики зависимости в слое годовых теплооборотов Лено-Амгинского междуречья средних значений параметра амплитудного ослабления и объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов глинистого (1) и песчаного (2) состава

Fig. 2. Plots relating average values parameter amplitude attenuation field HFMD to volumetric ice content within the layer of annual temperature fluctuation for frozen silts (1) and sands (2), Lena-Amga watershed

ется фактором дисперсности. В песчаных грунтах его влияние на затухание поля ВВМД меньше и поэтому параметр G сильнее реагирует на изменение объёмной льдистости. Свидетельство этому — повышение коэффициента множественной корреляции R^2 до 0,784, тогда как в глинистых грунтах этот показатель совместного действия факторов льдистости дисперсности среди других мерзлотно-грунтовых факторов существенно меньше и составляет 0,538. Это показывает, что песчаные грунты более благоприятны для изучения методом ДЭМП площадной изменчивости объёмной льдистости по параметру G .

Графики зависимости параметра G от объёмной льдистости (см. рис. 2), адекватно описываемые уравнениями полиномов пятого порядка, близки по форме к графикам уравнений логистической функции, которая, как известно, выражает общий закон преемственного поведения природно-технических систем между двумя крайними состояниями: начальным и конечным. В рассматриваемом случае такими состояниями, наблюдаемыми в глинистых грунтах (см. рис. 2, график 1), являются низкая ($W_{ob} \leq 0,300$ доли ед.) и высокая ($W_{ob} \geq 0,600$ доли ед.) объёмная льдистость

грунтов с высоким (G около 3,0 дБ/м) и низким (G менее 2,0 дБ/м) затуханием поля ВВМД. За границами этих предельных состояний параметр G практически теряет чувствительность к изменению в грунтах количества подземного льда. Зато в промежутке между грунтами с низкой и высокой льдистостью чувствительность параметра G становится максимальной. Это даёт основание считать, что и за пределами Лено-Амгинского междуречья Центрально-Якутской равнины будут сохраняться физические предпосылки применения не только метода ДЭМП, но и метода ДЗ с целью решения по параметру G одной из важнейших задач проектно-изыскательских работ и инженерной геокриологии — количественной оценки объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов.

Рассмотрим, с какой точностью решается эта задача в летний период по оси трассы железной дороги на ключевых участках Лено-Амгинского междуречья, т.е. в пределах двух групп статистически однородных выборок парных значений G и W_{ob} в глинистых и песчаных грунтах. Для адекватного решения этой задачи с максимальной возможной точностью вычислений W_{ob} из библиотеки уравнений программы «Stadia» [17] были подобраны следующие уравнения оптимальной функции:

$$W_{ob} = G / (0,00386 + 0,679G + 0,636G^2), R^2 = 0,835; \quad (4)$$

$$W_{ob} = G / (0,00408 + 1,070G + 0,564G^2), R^2 = 0,947. \quad (5)$$

Уравнение (4) применялось для вычисления среднего показателя объёмной льдистости в слое годовых теплооборотов до глубины 7–9 м на ключевом участке 1 трассы железной дороги (ПК6990-ПК7100) — высоких Абалахской и Маганской террас долины р. Лена, сложенных серыми лёссовидными суглинками, которые представляют собой вмещающую среду для залежей льдов. Аналогичным образом применялось уравнение (5) на ключевом участке 2 железнодорожной трассы (ПК7250-ПК7360) — низких Тюнгулунской и Бестяхской террас с грунтами преимущественно песчаного состава, содержащими редкие залежи льдов. Анализ абсолютной разницы вычисленных и лабораторных значений W_{ob} (табл. 2) показал, что вычисления по уравнению (4) более точны, чем по уравнению (5). В среднем, ошибка вычислений равна нулю и с доверительной вероятностью 95% рас-

Таблица 2. Статистика ошибок вычисления объёмной льдистости

Ошибка $W_{об}$, доли ед.	Участок 1	Участок 2
Среднее арифметическое	0,00	0,00
Среднее медианное	0,00	0,00
Среднее модальное	0,00	Нет данных
Стандартное отклонение	0,06	0,03
Минимальное значение	-0,15	-0,06
Максимальное значение	0,09	0,06
Количество определений	46	29
Уровень надежности 95%	0,02	0,01

пределена по нормальному закону (закону Гаусса) в интервале $\pm 0,01 \div 0,02$ доли ед. Разброс частных ошибок в 70% случаев не превышает $\pm 0,03 \div 0,06$ доли ед. Максимальные ошибки с положительным и отрицательным знаком изменяются от $\pm 0,09 \div 0,15$ до $\pm 0,06$ доли ед.

Отметим, что принятый доверительный уровень вероятности 70% установлен для методов геофизики, применяемых в геологии при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. Повышать его в области инженерной геофизики до 95% при изучении грунтов нет никаких оснований, так как все методы геофизики принципиально не могут однозначно и корректно решать задачи изучения геологической и грунтовой среды. По отношению к минимальным и максимальным значениям объёмной льдистости 70%-й разброс ошибок составляет 9,7–19,5 и 4,8–9,5%. Не превышая 20%, этот уровень точности достаточен для применения метода ДЭМП в строительной индустрии с целью районирования застраиваемых территорий по категории льдистости мёрзлых грунтов, в частности, в летний период года в полосе местности Лено-Амгинского междуречья, прилегающей к уже построенной и эксплуатируемой трассе железной дороги, или в других районах Центрально-Якутской равнины в сходных ландшафтно-геоморфологических и инженерно-геокриологических условиях.

Заключение

Экспериментальные исследования, выполненные методом ДЭМП на Лено-Амгинском междуречье Центрально-Якутской равнины, позволили установить статистически значимое

влияние объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов слоя годовых теплооборотов на затухание в этом слое поля ВВМД. Благодаря этому получила научное обоснование новая методика применения метода ДЭМП для решения важнейшей задачи проектно-изыскательских работ и инженерной геокриологии – количественной оценки объёмной льдистости мёрзлых грунтов по параметру G [10]. В отличие от традиционной методики построения геоэлектрических разрезов решение этой задачи в существенной степени облегчается и упрощается за счёт того, что не требует знания сопротивления и диэлектрической проницаемости мёрзлых грунтов, определение которых в промежуточной волновой зоне при использовании высоких частот более 1 МГц сопряжено с большими техническими и вычислительными трудностями.

Успешное решение методом ДЭМП задачи количественной оценки объёмной льдистости невозможно без предварительного анализа карт геокриологического картирования, построенных по методике ключевых участков местности [18]. Только на основе анализа этого материала появляется возможность правильно учитывать и прогнозировать искажающее влияние на параметр G состава и температуры мёрзлых грунтов. Кроме того, при любой возможности метод ДЭМП нужно применять вместе с методом георадиолокации. Этот высокоинформативный метод заслуживает всякого внимания. Несмотря на усложнение организации и увеличения стоимости проектно-изыскательских работ, он существенно снижает степень неоднозначности интерпретационных решений, повышая их достоверность вместе с точностью вычислений среднего показателя объёмной льдистости мёрзлых грунтов. Однако и самостоятельное применение метода ДЭМП обеспечивает на уровне доверительной вероятности 70% относительную ошибку вычислений по регрессионным уравнениям не выше 20%.

Такой уровень точности достаточен для быстрого и экологически чистого картирования по площади границ изменчивости объёмной льдистости мёрзлых грунтов между редкой сетью опорных точек скважин, пробуренных при производстве проектно-изыскательских, геолого-разведочных и горных работ. Экономический стимул применения метода ДЭМП – снижение в несколько раз организационных расходов,

транспортных издержек и объёма трудоёмких и дорогостоящих буровых и лабораторных работ.

нёву за моральную поддержку и помощь в выбранной теме научных исследований.

Благодарности. Автор выражает благодарность директору Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, профессору М.Н. Железняку за предоставленную возможность провести петрофизический эксперимент на железной дороге и заведующему лабораторией инженерной геокриологии этого же института Д.М. Шестер-

Acknowledgments. The author is grateful to the Director of the Permafrost Institute. P.I. Melnikov and Professor M.N. Zhelezniak for an opportunity to conduct a petrophysical experiment on the railroad and head of the laboratory of Permafrost Engineering at MPI of the same Institute, Dr. D.M. Shesternev for moral support and assistance in the chosen topic of scientific research.

Литература

References

1. Геннадиник Г.В. Геофизические исследования мёрзлых горных пород и льдов: Указатель литературы (1930–1985 гг.) / Ред. Б.И. Геннадиник. Якутск: изд. Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1986. 134 с.
2. Акимов А.Т., Клишес Т.М., Мельников В.П., Снегирёв А.М. Электромагнитные методы исследований криолитозоны / Ред. В.Д. Бадалов. Якутск: изд. Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1988. 48 с.
3. Нерадовский Л.Г. Электромагнитное изучение петрофизических характеристик льдистых пород Лено-Амгинского междуречья // Геофизика. 2007. № 2. С. 63–68.
4. Нерадовский Л.Г. Изучение ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2008. № 5. С. 460–467.
5. Титлинов В.С., Журавлёва Р.Б. Технология дистанционных индуктивных зондирований. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1995. 56 с.
6. Соловьёв П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 144 с.
7. Мельников П.И. Мерзлотно-грунтовые условия строительства в Якутии // Фундаменты сооружений на мёрзлых грунтах в Якутии. М.: Наука, 1968. С. 5–19.
8. ГОСТ 25100–95. Грунты. Классификация. М.: Изд-во стандартов, 1995. 31 с.
9. Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984. 534 с.
10. Нерадовский Л.Г. Научно-методические основы изучения мёрзлых грунтов слоя годовых теплооборотов методами электромагнитных зондирований: Дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2016. 378 с.
11. Нерадовский Л.Г. Электродинамические модели мёрзлых грунтов криолитозоны Централь-
1. Gennadinik G.V. *Geofizicheskie issledovaniya myorzlykh gornykh porod i l'dov: Ukazatel' literatury (1930–1985 gg.)*. Geophysical studies of frozen ground and ice: Bibliography (1930–1985). Ed. B.I. Gennadinik. Yakutsk: Permafrost Institute, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1986: 134 p. [In Russian].
2. Akimov A.T., Klishes T.M., Mel'nikov V.P., Snegirev A.M. *Elektromagnitnye metody issledovaniy kriolitozony*. Electromagnetic methods for permafrost research. Ed. V.D. Badalov. Yakutsk: Permafrost Institute, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1988: 48 p. [In Russian].
3. Neradovskiy L.G. Electromagnetic studies of Leno-Amginsky permafrost rocks petrophysical characteristics. *Geofizika*. Geophysics. 2007, 2: 63–68. [In Russian].
4. Neradovskii L.G. Study of ice complex at the Leno-Amginskii interfluvium using the magnetic field parameters. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. Geocology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology. 2008, 5: 460–467. [In Russian].
5. Titlinov V.S., Zhuravleva R.B. *Tekhnologiya distantsionnykh induktivnykh zondirovaniy*. The technology of remote inductive sounding. Ekaterinburg: Nauka, 1995: 56 p. [In Russian].
6. Soloviev P.A. *Kriolitizona severnoy chasti Leno-Amginskogo mezhdurech'ya*. Permafrost in the northern part of the Lena-Amga watershed. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1959: 144 p. [In Russian].
7. Melnikov P.I. Permafrost conditions for construction in Yakutia. *Fundamenty sooruzheniy na myorzlykh gruntakh v Yakutii*. Building Foundations on Permafrost in Yakutia. Moscow: Nauka, 1968: 5–19. [In Russian].
8. GOST 25100-95. *Grunty. Klassifikatsiya*. GOST 25100-95. Soils. Classification. Moscow: Publishing house of standards, 1995: 31 p. [In Russian].
9. *Instruktsiya po ehlektrozazvedke*. Instructions for electrical geophysical surveys. Leningrad: Nedra, 1984: 534 p. [In Russian].
10. Neradovskii L.G. *Nauchno-metodicheskie osnovy izucheniya myorzlykh gruntov sloya godovykh teplooborotov metodami elektromagnitnykh zondirovaniy*. Scientific and methodological basis for electromagnetic sounding of near-surface permafrost. PhD Dissertation. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the RAS, 2016. 378 p. [In Russian].
11. Neradovskii L.G. Electrodynamical models of permafrost in Central Yakutia. *Sovremennyyi nauchnyi potentsial i perspektivnye*

- ной Якутии // Современный научный потенциал и перспективные направления теоретических и практических аспектов: Материалы междунар. науч.-практич. конф. 27–28 февраля 2017 г. Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во КультИнформПресс, 2017. С. 26–33.
12. *Задериголова М.М.* Радиоволновой метод в инженерной геологии и геоэкологии. М.: Изд-во МГУ, 1998. 320 с.
 13. Комплекс СЭМЗ (среднечастотного электромагнитного зондирования). Техническое описание. Красноярск: изд. НПО «Сибцветметавтоматика», 1991. 30 с.
 14. *Лебедев В.Ф., Онущенко В.И., Литвинцева Л.М.* Комплекс СЭМЗ. Методическое пособие. Красноярск: изд. НПО «Сибцветметавтоматика», 1991. 60 с.
 15. *Вешев А.В., Любцева Е.Ф., Леончиков В.М., Алексеев В.М.* Временное руководство по методу электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем. М.: изд. Министерства цветной металлургии СССР, 1978. 45 с.
 16. *Вотяков И.Н.* Физико-механические свойства мёрзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск: Наука, 1975. 175 с.
 17. *Кулаичев А.П.* Методы и средства комплексного анализа данных. М.: Форум; Инфра-М, 2006. 512 с.
 18. *Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Романовский Н.Н., Максимова А.Н., Чижов А.Б.* Методика мерзлотной съемки. М.: Изд-во МГУ, 1979. 358 с.
 - napravleniya teoreticheskikh i prakticheskikh aspektov: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 27–28 fevralya 2017 g. Sankt-Peterburg.* Modern Science Potential and Promising Areas of Theoretical and Practical Aspects: Proc. of the Intern. Conf. 27–28 February 2017, St.-Petersburg. St.-Petersburg: KultInformPress, 2017: 26–33. [In Russian].
 12. *Zaderigolova M.M.* Radiovolnovoy metod v inzhenernoy geologii i geoekologii. The radiowave method in engineering geology and environmental geoscience. Moscow: Moscow State University, 1998: 320 p. [In Russian].
 13. *Kompleks SEMZ (srednечастотного ehlektromagnitnogo zondirovaniya).* Tekhnicheskoe opisanie. Complex SEMZ (Medium-frequency electromagnetic sounding system). Technical specification. Krasnoyarsk: NPO Sibtsvetmetavtomatika, 1991: 30 p. [In Russian].
 14. *Lebedev V.V., Onushchenko V.I., Litvintseva L.M.* Kompleks SEMZ. Metodicheskoe posobie. Complex SEMZ. Methodological guideline. Krasnoyarsk: NPO Sibtsvetmetavtomatika, 1991: 60 p. [In Russian].
 15. *Veshev A.V., Lyubtseva E.F., Leonchikov V.M., Alekseev V.M.* Vremennoe rukovodstvo po metodu elektromagnitnogo zondirovaniya s vertikal'nym magnitnym dipolem. Interim Guide for Using the Electromagnetic Sounding Method with a Vertical Magnetic Dipole. Moscow: Ministerstvo tsvetnoy metallurgii SSSR, 1978: 45 p. [In Russian].
 16. *Votyakov I.N.* Fiziko-mekhanicheskie svoystva myorzlykh i ottaivayushchikh gruntov Yakutii. Physico-mechanical properties of frozen and thawing soils in Yakutia. Novosibirsk: Nauka, 1975: 175 p. [In Russian].
 17. *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].
 18. *Kudryavtsev V.A., Garagulya L.S., Kondratieva K.A., Romanovskiy N.N., Maksimova A.N., Chizhov A.B.* Metodika merzlotnoy s'emki. Methods of permafrost surveying. Moscow State University, 1979: 358 p. [In Russian].