

порядков по размеру является характернейшей чертой метаморфических комплексов». А двумя абзацами выше на этой же странице отчета положение складок характеризуется следующим образом: складки второго порядка «лежание, шарниры их полого погружаются в направлении ВЮВ. Медвежья структура — сильно сжатая антиклиналь с аналогичным падением шарнира». Однако эти взгляды не получили в полной мере дальнейшего развития.

Западная часть Олимпиадинского месторождения приурочена не к крылу, а к «многоэтажному» замку Медвежинской антиклинали. Иными словами, и западная, и восточная части месторождения находятся в одинаковой структурной позиции по отношению к складчатости и в этом смысле составляют единое целое.

Пришарнирная часть Иннокентьевской синклинали, вмещающая Тырадинское месторождение и являющаяся второй по значимости складчатой рудоконтролирующей структурой, погружается не на восток—северо—восток, «минуя» Олимпиадинское месторождение, а на восток или даже восток—юго—восток, «подныривая» под него немного южнее и, образуя самый нижний потенциально рудоносный этаж. Примечательно, что замок этой синклинали, в свою очередь, также осложнен более мелкой складчатостью пологого восточного погружения [6].

Последний вывод имеет практическое значение. Именно здесь — к востоку либо к восток—юго—востоку от Тырадинского месторождения и на глубоких горизонтах под Иннокентьевским рудопроявлением скрыта возможность обнаружения слепого оруденения в зам-

ковой части Иннокентьевской синклинали. В условиях дальнейшего углубления горно—эксплуатационных работ на Олимпиадинском месторождении и соответствующего расширения наземной инфраструктуры проверка на рудность—безрудность этой, пока еще не исследованной на глубину, площади может стать актуальной задачей геологоразведочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ажгирей Г.Д. Структурная геология. — М.: Изд-во МГУ, 1966. — 363 с.
2. Вознесенский В.Д., Горлов Н.В., Доливо-Добровольский А.В. и др. Геологическая съемка сложно дислоцированных комплексов / Метод. пособие по геологической съемке масштаба 1:50 000. — Вып. 6. — ВСЕГЕИ — Л.: Недра, 1980. — 239 с.
3. Генкин А.Д., Лопатин В.А., Савельев Р.А. и др. Золотые руды месторождения Олимпиада (Енисейский край, Сибирь) // Геология рудных месторождений. — 1994. — Т. 36. — № 2. — С. 111–136.
4. ГОСТ 2.857–75. Межгосударственный стандарт. Горная графическая документация. Обозначения условные полезных ископаемых, горных пород и условий их залегания. — Введ. 01.01.1980. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. — 82 с.
5. Инструкция по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации м-ба 1:200 000 (Роскомнедра). — М.: 1995. — 244 с.
6. Ли Л.В. Олимпиадинское месторождение вкрапленных золото-сульфидных руд. — Красноярск: КНИИГиМС, 2003. — 120 с. (Эталонные модели рудных месторождений Сибири).
7. Михайлов А.Е. Структурная геология и геологическое картирование: Учеб. пособие для вузов — 4-е изд., доп. и перераб. — М.: Недра, 1984. — 464 с.
8. Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М., Яблокова С.В., Арефьева В.И. Уникальное промышленное золото-сульфидное месторождение Олимпиада в верхнепротерозойских терригенных отложениях // Руды и металлы. — 2014. — № 3. — С. 47–64.

© Журавлев В.В., 2016

Журавлев Владимир Владимирович // ZhuravlevVW@polyusgold.ru

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.372+523.31-335.7

Нерадовский Л.Г. (Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН)

СВЯЗЬ ЗАТУХАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ С ЭФФЕКТИВНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ И ТЕМПЕРАТУРОЙ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Рассмотрены результаты изучения методом индукции на одном из объектов геокриологического мониторинга в Якутии влияния эффективного электрического сопротивления мерзлых грунтов на затухание амплитуды электромагнитной волны, представленной сигналами индукции, измеренными на частоте 1,125 МГц. Природа этого влияния обусловлена термодинамикой мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов. Тем самым, появляется возможность быстро и экологически чисто изучать методом индукции с приемлемой для науки и практики точностью пространственно-временную изменчивость теплового состояния мерзлых оснований инженерных сооружений в освоенных и осваиваемых районах криолитозоны России. **Ключевые слова:** мерзлые

грунты, температура, эффективное электрическое сопротивление, коэффициент затухания сигналов индукции, термометрия скважин, метод индукции, корреляция.

Neradovskiy L.G. (Melnikov Permafrost Institute SB RAS)

DEPENDENCE OF ELECTROMAGNETIC WAVE AMPLITUDE ATTENUATION ON EFFECTIVE ELECTRICAL RESISTIVITY AND TEMPERATURE OF FROZEN GROUND

This paper discusses the results of a study at a geocryological monitoring site in Yakutia conducted with the induction method to investigate the influence of effective electrical resistivity of frozen soils on the amplitude attenuation of the electromagnetic wave represented by induction signals measured at a frequency of 1.125 MHz. The nature of this phenomenon is determined by the thermodynamics of permafrost material within the layer of annual temperature fluctuations. The results indicate that the induction method can be used to rapidly, environmentally friendly and sufficiently accurately assess the spatiotemporal changes in the thermal state of frozen foundation soils in areas of existing and new infrastructure in the permafrost regions of Russia. **Key words:** frozen ground,

В статье рассматриваются физические предпосылки применения одного из методов индукции¹ как быстрого, недорого и экологически чистого инструмента изучения динамики теплового состояния массивов мерзлых пород, используемых в освоенных и осваиваемых районах криолитозоны России в качестве оснований фундаментов инженерных сооружений, строящихся и эксплуатируемых по первому геотехническому принципу².

Такие методы в условиях рыночной экономики представляют первостепенный интерес для индустрии строительства, коммунального хозяйства и горнодобывающей промышленности, прежде всего, с точки зрения сбережения материально-технических и иных ресурсов, а также минимизации ущерба, наносимого окружающей среде вместе с минимизацией риска нарушения режима теплового обмена между криолитозоной и атмосферой Земли. Все вместе взятое имеет прямое отношение для устойчивого развития производительных сил Восточной Сибири, Дальнего Востока, Субарктики и Арктики.

Методы и техника индуктивной геоэлектрики зародились в геологоразведке и изначально были ориентированы на поиски и разведку рудных месторождений. Методы индукции начали изучаться почти одновременно за рубежом и у нас в стране с середины 1920-х годов. Большой вклад в их развитие внесли А.А. Петровский, В.Р. Бурсиан, В.А. Фок, А.П. Краев и А.И. Заборовский и другие отечественные ученые-геофизики. Территориально-тематическое применение методов индукции расширилось после того, как в 1962 г. А.В. Вешев предложил удобный способ пересчета характеристик магнитного поля в эффективное электрическое сопротивление геологической среды. Возможно, это стало причиной возникновения интереса к методам индукции со стороны горнодобывающей промышленности и строительной индустрии.

В Якутии метод индукции с прибором ДЭМП-2, работающим на частоте 128 кГц, применил в 1971 г. А.В. Вешев и др. с целью изучения границ распространения мерзлых грунтов с высоким содержанием льда [2]. При появлении в 1991 г. аппаратуры СЭМЗ, выпускаемой НПО «Сибцветметавтоматика», работы методом индукции в вариантах профилирования и зондирования стали выполняться в больших объемах разными организациями с целью изучения теплового состояния мерзлых оснований зданий и сооружений. Аналогичная задача, но в научном плане, решена В.В. Стогнием для условий криолитозоны Центрально-Якутской равнины [10].

¹ Методы, использующие источники искусственного гармонического, ступенчатого или импульсного возбуждения электрическим током геологической среды с последующей регистрацией на поверхности Земли, скважине или горных выработках индукционного эффекта.

² По этому принципу в основаниях зданий и сооружений в период их строительства и всего времени эксплуатации должны сохраняться грунты в мерзлом состоянии.

В сфере инженерных приложений доминировала задача картирования в плане и по глубине границ мерзлых и талых грунтов. При этом фиксировались в известный момент времени крайние тепловые состояния грунтов, но оставалась без внимания термодинамика промежуточных состояний, т.е. направленность и уровень изменчивости температурного поля между положительными и отрицательными температурами талых и мерзлых грунтов. Конечно же, такой поверхностный односторонний подход обеднял в целом информационную значимость результатов исследований динамики теплового состояния криолитозоны методами индуктивной геоэлектрики. Понятно, что это невозможно было сделать, не изучив прежде зависимости характеристик электромагнитных полей от температуры мерзлых пород и грунтов. Такие исследования на протяжении всей истории отечественной индуктивной геоэлектрики не проводились в лабораториях на образцах пород, грунтов и искусственных материалов, смесей и, тем более, в натурных условиях на массивах мерзлых пород и грунтов. Неизвестны такие эксперименты в ближнем и дальнем зарубежье³. Что касается методов геоэлектрики вообще, то известно несколько случаев не только изучения связей характеристик электрических полей, но и, что актуально, использования полученных результатов в решении практических задач. Примером может служить работа геофизиков МГУ, выполненная на Чукотском полуострове в 1991 г. В.Е. Афанасенко и др. [1]. Ими по данным вертикального электрического зондирования и профилирования на постоянном токе была вычислена температура толщи рудоносных мерзлых рыхлых отложений. Из работ настоящего времени отметим работу Е.И. Емельянова и В.М. Бондаренко [4]. Ими в Красноярском крае методом высокоразрешающей электроразведки⁴ по значениям электрического сопротивления с точностью 6 % вычислена в слое годовых теплооборотов (СГТ) на разной глубине температура мерзлых рыхлых отложений и коренных пород (долеритов). Другой пример найден в материалах 3-й Международной конференции по мерзлотоведению, прошедшей в 1978 г. в Канаде. В статье М.К. Seguin представлены результаты исследований в буровых скважинах на участках, расположенных в северной части Нового Квебека, на п-ове Унгава и в центральной части арктических островов [12]. Для разных типов пород установлена связь температуры и сопротивления. Связь оказалась настолько сильной, что был сделан вывод о целесообразности в сложных условиях северных районов Канады, делать оценку температуры мерзлых пород по данным электрокаротажа скважин. Еще один пример, свидетельствующий о термосвязи электросопротивления, найден в работе [11], где описаны результаты эксперимента, выполненного методом

³ Работ по этой тематике очень мало. В авторитетном журнале Международной Ассоциации мерзлотоведения «Permafrost and Periglacial Process Permafrost» из 250 публикаций за период 2003–2010 гг. всего 5,6 % приходится на геофизику. На этом фоне МГУ и ИМЗ СО РАН являются, пожалуй, единственными научными организациями в ближнем и дальнем зарубежье, где проводятся петрофизические эксперименты методами геофизики в криолитозоне.

⁴ Авторы не дают пояснения, что это за метод.

электротомографии в Канаде в области спорадического и сплошного распространения криолитозоны. Уровень корреляции с температурой сопротивления мерзлых илисто-песчаных отложений составил 0,62–0,69 в разных ландшафтно-геоморфологических условиях.

Частное доказательство связи удельного электрического сопротивления с температурой сделано в районе г. Якутск на примере слоев мерзлых супесей долины р. Лена [8].

В настоящей работе показаны термометрические возможности одного из неклассических методов геоэлектрики — метода дипольного дистанционного среднечастотного зондирования (ДДСИЗ) применительно к решению задач инженерно-геологических изысканий и мониторинговых исследований. С этой целью были проведены работы методом ДДСИЗ в точках скважин режимной термометрии, ранее пробуренных для контроля теплового состояния насыпи и мерзлого основания стратегического линейного сооружения — трассы ж/д Беркаит-Томмот-Якутск. Скважины размещались по створам на ключевых участках «ледового комплекса» Лено-Амгинского междуречья, являющегося частью Центрально-Якутской равнины.

В геологическом отношении разрез участка «ледового комплекса» Лено-Амгинского междуречья представлен мерзлой толщей четвертичных песчано-глинистых отложений озерно-аллювиального генезиса. Мощность толщи достигает 20–30 м и подстилается коренными породами (песчаниками, доломитами, известняками). До глубины залегания коренных пород глинистые отложения и, в меньшей степени, песчаные отложения разновысотных террас р. Лена пронизаны многочисленными залежами подземного льда повторно-жильного генезиса. В первом приближении залежи льда имеют клиновидную форму с многочисленными боковыми тонкожильными ответвлениями. Подробное описание климатических условий, геологического строения и геокриологических особенностей Лено-Амгинского междуречья дано П.А. Соловьевым [9]. Границы ареала распространения подземных льдов по трассе ж/д Беркаит-Томмот-Якутск изучены в 2006 г. методом индукции в варианте профилирования [5]. В этом же году аналогичные в технико-методическом исполнении на трассе Амуро-Якутской магистрали (АЯМ), примыкающей к упомянутой трассе ж/д, выполнены поисковые работы методом индукции с целью изучения его термометрических возможностей [6]. Результаты исследований опубликованы в другой работе, посвященной изучению термометрических возможностей метода ДДСИЗ в аспекте долговременного контроля теплового состояния мерзлого основания трассы ж/д на участке Томмот-Кердем-Нижний Бестях [7].

Методика и техника исследований

Термометрия скважин проводилась по стандартной методике [3] с использованием датчиков преобразования температуры DS18B20, отградуированных в лаборатории ИМЗ СО РАН с точностью порядка 0,01 °С. Информация о температуре передавалась с датчиков в ноутбук и сохранялась до последующей камеральной обработки.

Метод ДДСИЗ выполнялся по линиям створов скважин режимной термометрии, пересекающих трассу ж/д, а также по профилям, где бурение режимных скважин не было предусмотрено. То есть в тех местах трассы ж/д, где после ее строительства начали развиваться процессы заболачивания естественного основания и наблюдались признаки деформации тела насыпи ж/д. Длина профилей не более 200 м. Расстояние между точками зондирования изменялось от 5–10 до 30–50 м.

Измерения сигналов индукции (значений амплитуд вертикальной и горизонтальной составляющих магнитного поля) проводились стрелочной аппаратурой СЭМЗ на частоте 1,125 МГц. Использовалась схема разнесения приемной антенны (ПРМ) от неподвижной передающей антенны (ПРД), установленной горизонтально на треноге с угломерным устройством около точки скважины. Антенна ПРМ с измерителем переносилась вдоль автодороги, удаляясь от антенны ПРД с шагом 5 м на расстояние (разнос АО) до 30 м. Высота антенн над поверхностью земли была выбрана равной около 1 м.

Схема измерений реализует возбуждение грунтов насыпи и естественного основания трассы ж/д высокочастотным вертикальным магнитным диполем. Строгой теории для этого диполя нет, и поэтому не было возможности решить ни прямую, ни обратную задачу электромагнитного зондирования и вместе с тем выполнить сравнительный анализ теоретических и опытных значений характеристики, описывающей скорость затухания энергии электромагнитного поля, т.е. коэффициента затухания k . Оставалось ограничиться вычислением значений эффективного электрического сопротивления (ρ_{ef}), построением графиков этой характеристики и качественным анализом формы ее графика в зависимости от расстояния между антеннами ПРМ-ПРД (глубины зондирования). Значения (ρ_{ef}) вычислялись по прежде вычисленному отношению вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_r) составляющих магнитного поля. Для этого использовался компьютерный калькулятор А.Е. Каминского. Вычисленные ρ_{ef} относились к точкам нахождения антенны ПРМ.

Показатель степенной функции⁵, аппроксимирующей амплитудные графики отношения H_z/H_r и модуля H_z , H_r принимался за эмпирическую оценку k , несущую информацию о затухании сигналов индукции в нерасчлененном слое насыпи ж/д и ее естественного основания. Найденные эмпирические оценки k относились к точке стояния антенны ПРД. Точную ошибку нахождения оценок неизвестных истинных значений k найти невозможно в условиях проведения натурного эксперимента, и поэтому она приравнивалась к погрешности измерений H_z и H_r , которая не превысила 15 %.

⁵ Теоретически затухание электромагнитного поля в однородных изотропных средах принято описывать экспоненциальной функцией, но практически она проигрывает степенной функции по точности аппроксимации сигналов индукции, зарегистрированных после их прохождения неоднородных по строению и анизотропных по свойствам мерзлых грунтов.

Результаты зондирований привязывались к точкам скважин режимной термометрии. Благодаря этому удалось установить, что средняя эффективная глубина проникновения электромагнитного поля на частоте 1,125 МГц в зависимости от сопротивления геоэлектрического разреза изменялась от 6–8 ($(1/5 \div 1/4)$ АО) до 10–15 м ($(1/3 \div 1,5)$ АО).

Обсуждение результатов

Зависимость характеристики k от базовой электрофизической характеристики — эффективного электрического сопротивления мерзлых грунтов, построенная по выборке из 49 определений, носит закономерный характер, корректно и адекватно описываемый уравнением логарифмической регрессии (рис. 1). Уровень детерминации зависимости, информационная значимость и чувствительность k к изменению ρ_{ef} существенно выше при использовании не отношения H_z/H_r , а модуля H_z и H_r . По этому параметру в соответствие с уравнением регрессии затухание электромагнитного поля в мерзлом основании трассы ж/д носит нелинейный характер и начинает быстро расти со средних значений $\rho_{ef} < 1000$ Ом·м. Такой уровень сопротивления типичен для большей части мерзлых грунтов основания трассы ж/д. При $\rho_{ef} > 1000$ Ом·м затухание поля приобретает монотонный характер и плавно уменьшается до значений $1,0 - 1,5$ м⁻¹. Природа высоких сопротивлений этой части зависимости неоднозначна. В одних случаях она объясняется высокой пористостью мало-влажных мерзлых нелдыстых песчаных грунтов с повышенной или высокой температурой порядка $(0,1 \div 0,5)^\circ\text{C}$, а в других случаях — высокой сегрегационной льдистостью лессовидных суглинков и супесей и присутствием в них залежей подземных льдов с температурой не выше -1°C . Неоднозначность поведения характеристики ρ_{ef} на границе около -1°C установлена в предыдущих исследованиях [6, 7]. Ради сравнительного анализа по фактору места и времени эта важная повторяющаяся типологическая особенность иллю-

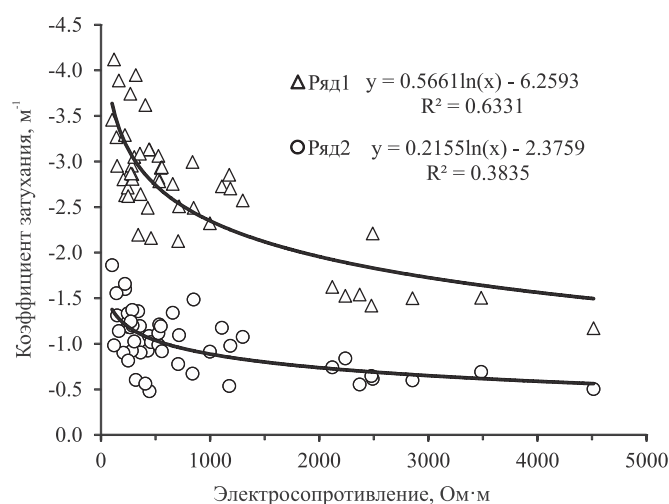


Рис. 1. Логарифмическая зависимость коэффициента затухания сигналов индукции от среднего эффективного электросопротивления мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов до глубины 10 м. Трасса ж/д на участке Томмот-Кердем-Нижний Бестях, июнь 2014 г.: ряд 1 — по характеристике затухания модуля H_z и H_r ; ряд 2 — по характеристике затухания H_z/H_r

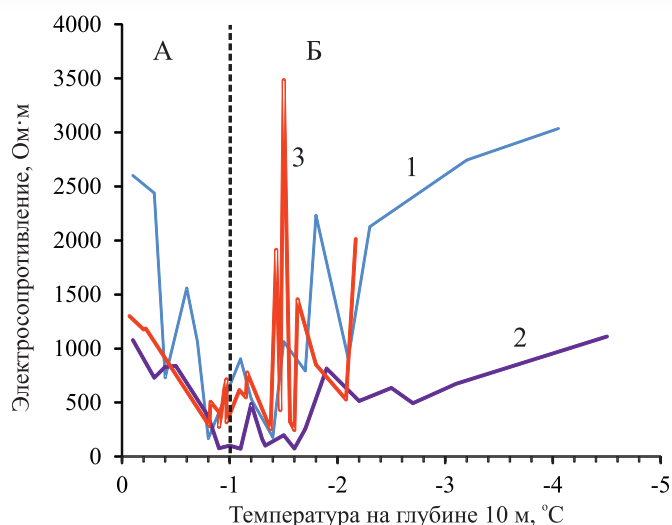


Рис. 2. Графики эмпирической связи по трассам линейных сооружений среднего эффективного электросопротивления и температуры мерзлых грунтов разного строения, текстуры и состава в слое годовых теплооборотов до глубины 10 м: А — область песчаных маловлажных мерзлых грунтов с высоким температурным режимом на Бестяхской террасе долины р. Лена; Б — область преимущественно глинистых грунтов с низкотемпературным режимом и залежами подземных льдов повторно-жильного генезиса на Маганской и Абалахской террасах долины р. Лена; 1 — трасса Амуро-Якутской автомагистрали (июнь 2006 г.); 2 — трасса ж/д на участке Томмот-Кердем-Нижний Бестях (сентябрь 2011 г.); 3 — то же, ледовый комплекс Лено-Амгинского междуречья, июнь 2014 г.

стрируется рис. 2. Если ее не учитывать при проведении статистического анализа фактического материала термометрии скважин и метода ДДСИЗ, то термосвязь ρ_{ef} будет скрыта и будет принято неправильное решение об ее отсутствии. Во избежание этого фактический материал, как и раньше, был разбит на две области определения ρ_{ef} по вышеуказанной температурной границе. По ним проводились дальнейшие исследования с целью изучения ошибки вычисления по ранее найденным математическим моделям (уравнениям регрессии) двух характеристик теплового состояния мерзлого основания трассы ж/д по состоянию на июнь 2014 г.

Первая характеристика (t_{sr}) давала представление о средней температуре мерзлых грунтов в СГТ ниже сезонно-талого слоя до глубины 10 м, а вторая характеристика (t_z) — сведения о текущей фиксированной температуре мерзлых грунтов на максимальной глубине термометрии скважин, соответствующей мощности СГТ, т.е. на глубине 10 м.

Методика исследований состояла в выполнении статистических операций в следующей последовательности:

- 1) поиск модели связи характеристик t_z , t_{sr} между собой и с характеристикой k ;
- 2) вычисление по k значений характеристик t_z и t_{sr} , а по t_{sr} — значений характеристики t_z по состоянию на лето 2014 г.;
- 3) вычисление t_z по моделям сентября 2011 г.;
- 4) сравнительный анализ ошибок вычислений t_z по моделям 2011 и 2014 гг.

Посмотрим, как распределены парные связи $t_z \rightarrow k$ в разные межгодовые сезоны. Общая диаграмма раз-

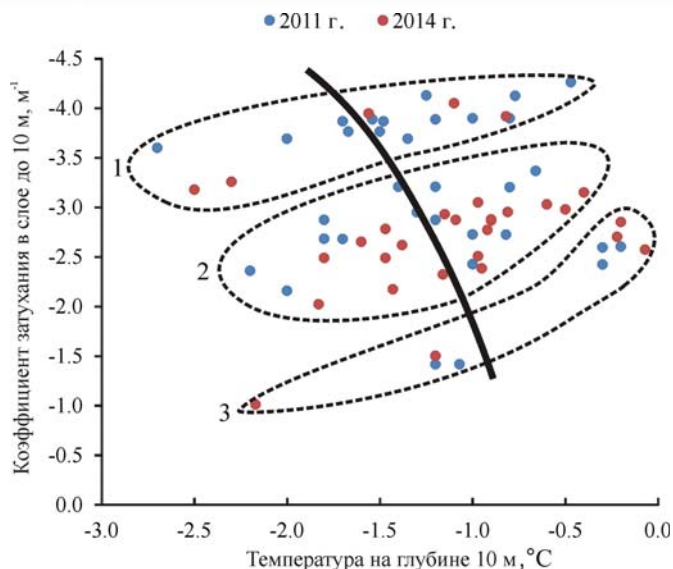


Рис. 3. Отсортированные и агрегированные области эмпирической связи на ледовом комплексе Лено-Амгинского междуречья коэффициента затухания вертикальной составляющей магнитного поля и температуры мерзлых дисперсных грунтов в слое годовых теплооборотов до глубины 10 м. Термостворы скважин по трассе ж/д на участке Томмот-Кердем-Нижний Бестях, сентябрь 2011 г. и июнь 2014 г.: 1 — модель льдистых лессовидных суглинков с залежами подземных льдов повторно-жильного генезиса; 2 — модель слабольдистых мерзлых грунтов смешанного песчано-глинистого состава; 3 — модель нельдистых мерзлых грунтов преимущественно песчаного состава

броса фактического материала после его сортировки с агрегированием и корректировкой в пределах ошибок полевых определений показывает, что характеристики k и t_z распределены неравномерно. Они образуют три области ТТТ⁶, сдвинутые относительно друг друга с одинаковым углом наклона по оси абсцисс (рис. 3). Этот признак в который раз доказывает, что рост затухания электромагнитного поля наблюдается при повышении температуры мерзлых грунтов в разные межгодовые сезоны. Механизм этого явления обусловлен периодической перестройкой структуры, изменением свойств и соотношения количества незамерзшей воды, льда и газа, которые непрерывно происходят в открытых и неравновесных термодинамических системах, каковыми являются массивы мерзлых грунтов. Интенсивное перераспределение потоков тепловой энергии в СГТ вызывает согласованный отклик геолого-геофизических характеристик⁷, совокупность которых дает представление о текущем состоянии термодинамики мерзлых грунтов. Со стороны геологии — это характеристики температурного поля, а со стороны геофизики — характеристика k . Их совместное применение повышает достоверность и пол-

⁶ Это частные выборки из генеральной совокупности, включающей в себя подмножества всех теоретически возможных значений и парных корреляций, полностью характеризующих исследуемые характеристики мерзлых грунтов Лено-Амгинского междуречья.

⁷ Сначала — базисных характеристик (электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости), а они затем генерируют изменение характеристик *волновых свойств мерзлых грунтов*, в частности, коэффициента затухания амплитуды электромагнитных волн мегагерцового диапазона частот, представленных сигналами индукции.

ноту результатов изучения динамики теплового состояния мерзлых грунтов⁸.

Природа сдвига областей (рис. 3) по характеристике k при равных значениях температуры есть свидетельство того, что грунты разного строения, состава и свойств характеризуются разным фоновым затуханием электромагнитного поля. Если провести линию через центры выборочных совокупностей (1–3 областей), то среднее значение фона изменится от минимума у нельдистых мерзлых песков ($-1,7 \text{ м}^{-1}$) при температуре $-1,0^\circ\text{C}$ до максимума у льдистых глинистых грунтов с подземными льдами ($-3,8 \text{ м}^{-1}$) при температуре $-1,6^\circ\text{C}$. Такая особенность, как и у термосвязи ρ_{ef} , требует разбиения первичного фактического материала на отдельные области и анализа термосвязи k в отдельно взятых областях.

Результаты вычисления t_z в точках скважин режимной термометрии представлены в таблице. Вычисления выполнялись по уравнениям регрессии логистического типа по той причине, что они корректно описывают связь k с температурой⁹:

$$t_z = -152,3 + 152,4 / (1 + 0,1012 \cdot \exp(-0,6761 \cdot k)), \quad (4)$$

$$t_z = -0,00198 - 2,02 \cdot k + 0,635 \cdot k^2, \quad (5)$$

$$t_z = -0,000491 - 1,5 \cdot k + 0,325 \cdot k^2, \quad (6)$$

где t_z — температура на глубине 10 м, $^\circ\text{C}$; k — коэффициент затухания¹⁰ в слое мерзлых грунтов до глубины 10 м по параметру амплитуды характеристики вертикальной составляющей магнитного поля H_z , м^{-1} .

Статистический анализ рядов ошибок показывает, что вероятность их распределения не соответствует нормальному теоретическому закону и лучше всего, из остальных теоретических законов, соответствует закону Вейбулла. Более того, по отношению к осени 2011 г. температура мерзлых грунтов, вычисленная летом 2014 г., оказывается систематически заниженной в среднем на $1,5^\circ\text{C}$ по арифметическому показателю, на $1,7^\circ\text{C}$ — по медианному показателю и на $2,7^\circ\text{C}$ — по модальному (вероятностному) показателю. Это, конечно же, недопустимо много в абсолютном измерении, хотя относительный характер пространственной измен-

⁸ Метод термометрии скважин делает это пассивно, фиксируя температуру — реакцию криогенных систем на их тепловое периодическое возбуждение со стороны атмосферы Земли. Что касается метода ДДСИЗ, то он извлекает информацию о текущей термодинамике криогенных систем путем активного их возбуждения на дневной поверхности источниками гармонического электромагнитного поля, фиксируя конечный результат — реакцию систем в виде рассеяния и поглощения электромагнитной энергии. В этом состоит технологическая разница и информационная равнозначность исследуемых геолого-геофизических характеристик.

⁹ Уравнения применяются для следующих условий трассы ж/д: (4) — сентябрь 2011 г., (5) — июнь 2014 г., (6) — то же, для ряда точек с фоновыми значениями $k > 2,5 \text{ м}^{-1}$.

¹⁰ Эта характеристика имеет отрицательный знак, указывающий на ослабление энергии электромагнитного поля по глубине, но для использования в качестве аргумента корректного уравнения логистической регрессии знак характеристики изменен на положительный знак. Логистическая функция не допускает использования аргумента с отрицательными значениями. Для единообразия вычислительного процесса значения k в уравнении (6) также применялись с положительным знаком.

Ошибки вычисления температуры мерзлых грунтов

Номер точки, скв.	Номер пикета, трассы	t_z скв., 2014 г.	t_z ДДСИЗ 2014 г.	t_z ДДСИЗ 2011 г.	Ошибки расчета t_z , °C	
					2014 г.	2011 г.
4_12	6924	-1.47	-1.09	-2.71	-0.38	1.24
5_12	6924	-1.6	-1.75	-2.19	0.15	0.59
17_11	7009	-0.81	-0.49	-2.01	-0.32	1.20
20_11	7010	-0.92	-0.72	-2.23	-0.20	1.31
19_11	7010	-0.9	-1.33	-3.20	0.43	2.30
15_11	7088	-1.38	-1.18	-2.86	-0.20	1.48
14_11	7088	-1.16	-1.47	-3.66	0.31	2.50
11_11	7174	-0.82	-1.02	-0.93	0.20	0.11
10_11	7175	-1.09	-1.07	-2.67	-0.02	1.58
16_11	7179	-1.63	-1.58	-4.33	-0.05	2.70
19_12	7179	-1.56	-1.10	-1.00	-0.46	-0.56
18_12	7189	-1.43	-1.56	-4.13	0.13	2.70
1_12	7189	-1.47	-1.78	-2.41	0.31	0.94
2_12	7489	-1.15	-1.72	-2.00	0.57	0.85
5_12	7489	-2.08	-1.76	-2.22	-0.32	0.14
6_12	7498	-0.9	-0.57	-2.09	-0.33	1.19
6_11	7513	-0.97	-1.18	-2.86	0.21	1.89
7_12	7513	-0.97	-1.08	-2.68	0.11	1.71
9_11	7563	-1.8	-1.44	-3.54	-0.36	1.74
7_11	7564	-0.95	-1.25	-3.00	0.30	2.05
8_11	7564	-2.17	-1.61	-4.80	-0.56	2.63
4_11	7850	-0.2	-0.60	-2.11	0.40	1.91
3_11	7850	-0.22	-0.82	-2.34	0.60	2.12
1_11	7850	-0.07	-0.52	-2.04	0.45	1.97
2_11	7850	-1.2	-1.29	-3.09	0.09	1.89

Примечание: t_z — температура

чивости температурных рядов 2011 и 2014 гг. по трассе ж/д воспроизводится на приемлемом уровне (корреляция около 0,6), как по фоновой составляющей, так и по локальной составляющей температурного поля.

Причина системного расхождения температурных рядов объясняется не только сезонными вариациями фоновых значений k^{11} , но и более высокими значениями затухания параметра модуля H_z и H_r (2014 г.) в сравнении с параметром H_z (2011 г.). Кроме того, геокриологические условия и температурный режим полосы местности, по которой проложена трасса ж/д, могли измениться за 3 года. Введение поправки (прибавка температуры +1,7 °C к значениям t_z июня 2014 г.) сохраняет относительный характер изменчивости температурных рядов, а вероятность завышения-занижения температуры по отношению к данным термометрии скважин делает равной при практически средней нулевой ошибке. При заданной доверительной вероятности¹² разброс частных ошибок не превышает $\pm 0,87$ °C.

¹¹ При прочих равных условиях летом фон затухания ниже, а осенью выше, так как мощность сезонно-талого слоя увеличивается.

¹² Для методов прикладной геофизики, применяемых в практике геологоразведочных работ, принят уровень доверия 70 %. Принятие решений на более высоком уровне, как это делают некоторые исследователи, нельзя признать обоснованным.

Ошибки t_z модели июня 2014 г., построенной путем привязки данных ДДСИЗ к термометрии сохранившихся¹³ скважин этого сезона года, в 70 % случаев не выходят за границы диапазона $\pm 0,34$ °C.

Заключение

В результате проведенных петрофизических исследований впервые изучена в натуральных условиях зависимость затухания электромагнитного поля от среднего эффективного электрического сопротивления мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов. Эта причинно-следственная зависимость порождает другую связь — связь корреляционного типа между затуханием электромагнитного поля и характеристиками температурного поля мерзлых грунтов слоя годовых теплооборотов. С позиций термодинамики открытых неравновесных криогенных систем Земли, наблюдаемые связи возникают под действием непрерывного периодического перераспределения тепловых потоков в слое годовых теплооборотов. Именно эта первопричина оказывает согласованное температурное влияние на базовую электрофизическую характеристику мерзлых грунтов (электросопротивление) и через нее генерирует согласованную температурную изменчивость затухания электромагнитного поля. Закон этого изменения, как показывают наши исследования в Восточной Сибири и Дальнем Востоке, носит вероятностно-детерминированный характер и описывается по факторам пространственно-временной и физической общности уравнением логистической регрессии. Производственный аспект результатов исследований состоит в верификации точности вычисления температуры мерзлых грунтов по данным метода ДДСИЗ в сравнении с методом термометрии скважин. Достигнутая точность в средних показателях удовлетворяет требованиям проектно-изыскательских работ. Максимум эффективности оценки температуры мерзлых грунтов по данным метода индукции ожидается в сетях долговременного температурного мониторинга объектов промышленной и гражданской инфраструктуры в освоенных и осваиваемых районах криолитозоны России.

ЛИТЕРАТУРА

- Афанасенко В.Е., Бойков С.А., Петрухин Б.П. Изучение теплового состояния пород в долине р. Кувет электроразведочными методами / Геокриологические исследования: сб. науч. тр. / Под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Изд-во МГУ, 1991. — С. 146–150.
- Вешев А.В., Ивочкин В.Г., Игнатьев Г.Ф. Электромагнитное профилирование — Л.: Недра, 1971. — 216 с.
- ГОСТ 25358-82. Грунты. Метод полевого определения температуры. — М.: Изд-во Госкомитета СССР по делам строительства, 1982. — 14 с.
- Емельянов Е.И., Бондаренко В.М. Определение температуры многолетнемерзлых пород в слое годовых теплооборотов методом высоторазрезающего электрического зондирования // Промышленное и гражданское строительство. — 2013. — № 11. — С. 18–21.
- Нерадовский Л.Г. Изучение ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья по характеристикам электромагнитного поля // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2008. — № 5. — С. 460–467.

¹³ В процессе эксплуатации железной дороги рано или поздно происходит повреждение или полное уничтожение точек скважин в режимной мониторинговой сети наблюдений. Это является большим недостатком метода термометрии скважин с полупроводниковыми датчиками, который должен восполняться методами геофизики, в частности, методом ДДСИЗ.

6. Нерадовский Л.Г., Скачков Ю.Б. Возможности использования электромагнитного поля для температурного мониторинга многолетнемерзлых пород Центральной Якутии / Матер. Междунар. конф. «Криогенные ресурсы полярных регионов». — Т. 2. — Салехард, 2007. — С. 173–176.
7. Нерадовский Л.Г., Литовко А.В. Опыт и перспективы использования индуктивной электроразведки в мониторинге температур мерзлых грунтов // Криосфера Земли. — 2013. — № 2. — С. 217–226.
8. Нерадовский Л.Г. Опыт изучения влияния температуры на удельное электрическое сопротивление мерзлых грунтов // Геофизика. — 2013. — № 1. — С. 67–70.
9. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 144 с.
10. Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии. — Якутск: Изд-во ООО «Академия», 2003. — 124 с.
11. Lewkowicz A.G. Characteristics of Discontinuous Permafrost based on Ground Temperature Measurements and Electrical Resistivity Tomography Southern Yukon, Canada / B. Etzelmüller, S.L. Smith // Permafrost and periglacial processes. Vol. 22, Issue 4, October. — 2011. — P. 320–342.
12. Seguin M.K. Temperature-electrical resistivity relationship in continuous permafrost at Purtuniqu, Ungava peninsula / Third International conference on permafrost Proceedings. — 1978. — Vol. 1. — P. 137–144.

© Нерадовский Л.Г., 2016

Нерадовский Леонид Георгиевич // leoner@mpi.ysn.ru

УДК 550.837.6

Любич В.А., Григорьев В.Ф. (ФГБНУ «Полярный геофизический институт»)

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ АРКТИЧЕСКИХ ОСТРОВОВ

Статья посвящена применению электромагнитных методов для изучения геологического строения малодоступных арктических островов. На архипелаге Шпицберген продемонстрирована принципиальная возможность применения мощного контролируемого источника электромагнитного излучения экстремально низкочастотного (ЭНЧ) диапазона, расположенного в северной части Кольского полуострова, для электромагнитного зондирования (ЭМЗ) земной коры. Показано, что для лучшей интерпретации полученной геофизической информации целесообразно комбинировать результаты ЭМЗ с контролируемым источником и данные магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Ключевые слова: электромагнитное зондирование, магнитотеллурическое зондирование, осадочный чехол.

Lubchich V.A., Grigorev V.F. (Polar Geophysical Institute)

ELECTROMAGNETIC SOUNDING OF THE EARTH'S CRUST IN THE ARCTIC ISLANDS

The article deals with utilization of electromagnetic geophysical methods to study the geological structure of inaccessible Arctic Islands. Possibility of applying the powerful transmitter of electromagnetic fields of extremely low frequency (ELF) range, located in the Northern part of Kola Peninsula, for electromagnetic sounding of the Svalbard archipelago was demonstrated. It was shown that integrated interpretation of magnetotelluric data and electromagnetic sounding with controlled source data is useful. Key words: electromagnetic sounding with controlled source, magnetotelluric sounding, sedimentary rock cover.

В настоящее время изучение геологического строения районов Арктики является актуальной научной задачей в связи с развитием минерально-сырьевой базы, экономики и поиска новых месторождений полезных ископаемых в данном регионе. Вследствие удаленности и малодоступности арктических островов представляет интерес возможность применения электромагнитных методов для исследования их геологического строения в силу мобильности, экологичности и малозатратности производственных геофизических работ.

В статье рассмотрены результаты эксперимента по электромагнитному зондированию земной коры, проведенного сотрудниками Полярного геофизического института (ПГИ) в 2014 г. на арх. Шпицберген. Целью эксперимента было изучение возможности использования искусственных и естественных электромагнитных полей для определения геоэлектрического разреза осадочного чехла. Источник искусственного электромагнитного поля располагался в северной части Кольского п-ова [2].

Применение современных измерителей электромагнитного поля с цифровой системой регистрации и сбора данных позволило одновременно провести измерения как искусственных, так и естественных электромагнитных полей. В ходе эксперимента исследовалась возможность применения методики МТЗ в полярных широтах, т.е. в районах, расположенных в непосредственной близости от основных источников магнитотеллурических полей. Следует отметить, что термин магнитотеллурическое зондирование в статье употребляется в общем смысле, как методика, основанная на измерениях вариаций естественного электромагнитного поля Земли, и включает в себя исследование в звуковом диапазоне частот (аудио-МТЗ).

Геологическое строение арх. Шпицберген изучалось в основном по результатам бурения разведочных скважин глубиной до 800 м трестом «Арктикуголь» и нескольких структурных скважин глубиной до 3000 м. Так, скв. Грумантская-1 вскрыла мощный осадочный чехол и на глубине порядка 2600 м достигла кристаллического фундамента [7]. Электромагнитными геофизическими методами данный район практически не исследовался. Таким образом, в ходе экспериментальных работ фактически впервые были применены наземные электромагнитные методы для исследования геоэлектрических свойств осадочного чехла арх. Шпицберген.

В 2014 г. на арх. Шпицберген сотрудниками ПГИ был проведен эксперимент по дистанционному электромагнитному зондированию земной коры. В качестве контролируемого источника электромагнитного поля использовался экспериментальный образец мощного генератора, разработанный в ПГИ на базе повышающего преобразователя и системы энергопередачи генератора «Энергия-2» [5]. Номинальная мощность передатчика составляет 200 кВт. Гармоническое электромагнитное поле в диапазоне частот от 3 до 33 Гц излучалось горизонтальным заземленным диполем длиной около 60 км, расположенным в северной части Кольского п-ова и ориентированным в субширотном направлении. Сила действующего тока составляла порядка 65–80 А.