

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 624.139+550.83.04

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОМ ИНДУКЦИИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЯ
АВТОДОРОГИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ “АМУР” (ЧИТА–ХАБАРОВСК)

Д.М. Шестернев, Л.Г. Нерадовский, А.В. Литовко

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; shesdm@mail.ru, leoner@mpi.ysn.ru*

Дано научное и практическое обоснование эффективности использования метода индукции для мониторинга теплового состояния многолетнемерзлых оснований эксплуатируемых линейных сооружений. Выполнена оценка точности вычисления температуры пород с использованием метода индукции и статистических моделей в сравнении с данными эталонного метода. Полученные результаты доказывают гипотезу о региональной повторяемости термосвязи скорости затухания амплитуды сигналов индукции в слое годовых теплооборотов криолитозоны и возможности применения метода для оценки изменения теплового состояния мерзлых грунтов, залегающих в естественных условиях и используемых в качестве оснований линейных сооружений.

Автомобильная дорога, грунты, метод термометрии скважин, метод индукции, температура, коэффициент затухания

STUDY OF THE SUBGRADE THERMAL CONDITION BELOW
THE AMUR FEDERAL ROAD (CHITA TO KHABAROVSK) BY THE INDUCTION METHOD

D.M. Shesternev, L.G. Neradovskii, A.V. Litovko

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
677010, Yakutsk, Merzlotnaya str., 36, Russia; shesdm@mail.ru, leoner@mpi.ysn.ru*

This paper provides scientific and practical justification indicating that the induction method can be effectively used for thermal monitoring of permafrost soils beneath linear structures. The accuracy of ground temperature predictions with the induction method and statistical model is evaluated in comparison to data obtained with the reference method. The results of the study support the hypothesis of regional repeatability of the temperature dependence of induction signal attenuation rates in permafrost within its layer of annual temperature fluctuations and demonstrate the capability of the induction method for assessing permafrost ground temperature changes both in natural environments and in road subgrade linear structures.

Highway, soil, borehole thermometry, induction method, temperature, attenuation coefficient

ВВЕДЕНИЕ

Методы индукции¹ для изучения геологической среды начали применяться с середины 20-х гг. прошлого века. Большой вклад в их развитие внесли А.А. Петровский, В.Р. Бурсиан, В.А. Фок, А.П. Краев и А.И. Заборовский. Несмотря на длительный период формирования методов и техники индуктивной геоэлектрики, они изначально были ориентированы на поиски и разведку рудных месторождений. Среди других инженерных приложений доминировала задача ис-

следования состояния пород вечной мерзлоты (криолитозоны). В настоящей работе рассматривается применение метода индукции для изучения вечной мерзлоты.

Первые исследования дальности распространения электромагнитных волн в слое годовых теплооборотов вечной мерзлоты выполнены в 1940-х гг. на территории г. Игарка. Для этого был использован метод ондометрии с кольцевыми приемно-передающими антеннами диаметром 50 см,

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

работающими на частоте 300–400 и 800–1000 Гц² [Петровский, Достовалов, 1947]. Дальнейшее развитие и более широкое применение этот метод, названный методом индукции, получил после того, как в 1962 г. был предложен относительно простой способ пересчета характеристик магнитного поля в эффективное электрическое сопротивление геологической среды [Вешев и др., 1971]. Метод широко применялся Производственным и научно-исследовательским институтом по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) для изучения геокриологических условий строительства трасс газопроводов в Западной Сибири. Для реализации метода использовался прибор дипольного электромагнитного профилирования “ДЭМП-3”, работающий на частотах 32, 128, 512, 2048 кГц [Красовский, 1971, 1973]. На территории г. Тикси этот метод с использованием прибора “ДЭМП-2” позволил изучить границы распространения в плане и по глубине вечной мерзлоты с высоким содержанием льда [Вешев и др., 1971]. Дальнейшее расширение границ применения метода индукции связано с выпуском НПО “Сибцветметавтоматика” в 1991 г. аппаратуры средне-частотного электромагнитного зондирования (СЭМЗ). Это дало возможность методом индукции выполнять разными организациями большие объемы работ в вариантах профилирования и зондирования с целью изучения теплового состояния мерзлых оснований зданий и сооружений в Якутии и других холодных регионах. Такая же тематика научных исследований ставилась перед методом переходных процессов³ при изучении границ распространения и определения мощности таликов и криопэгов [Нум и др., 1994; Стогний, 2003].

Авторы вышеперечисленных работ в текущий момент времени по характеристикам электромагнитных полей фиксировали два крайних тепловых состояния геологической среды (мерзлое и талое), оставляя без внимания промежуточные состояния. Конечно же, это обедняло информационную значимость результатов геофизических исследований в части изучения динамики теплового состояния криолитозоны. Возникла необходимость выявления связи между температурой пород и характеристик затухания в них электромагнитных полей. Такие исследования на протяжении всей истории отечественной индуктивной геоэлектрики не проводились ни в лабораториях, ни, тем бо-

лее, в полевых условиях⁴. Известны лишь несколько случаев практического применения методов геоэлектрики для количественной оценки температуры мерзлых грунтов. Начали их использовать геокриологи и геофизики Московского университета им. М.В. Ломоносова на Чукотке. Им, по данным методов вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и профилирования на постоянном токе, удалось вычислить с точностью 16 % и построить карту температур рудоносных мерзлых рыхлых отложений на глубине залегания вскрытого горными выработками плотика коренных пород [Афанасенко и др., 1991]. Спустя много лет методом высокоразрешающей электроразведки⁵ в Красноярском крае по значениям электросопротивления была вычислена с точностью 6 % температура мерзлых рыхлых отложений и коренных пород (долеритов) в слое годовых теплооборотов и построен геотермический разрез [Емельянов, Бондаренко, 2013].

Сильная связь электросопротивления с температурой выявлена при исследовании криолитозоны Канады методом электрокаротажа скважин. На этом основании было предложено использовать электрокаротаж для оценки температуры разреза скважин в тех случаях, когда полупроводниковой термометрией сделать это затруднительно или невозможно [Seguin, 1978]. Приемлемая для практики корреляция электросопротивления с температурой мерзлых илесто-песчаных отложений установлена на уровне 0.6–0.7 в разных ландшафтно-геоморфологических условиях криолитозоны Канады, но уже с поверхности Земли с применением современного метода электротомографии [Lewkowicz et al., 2011].

Начиная с 2006 г. связь характеристик скорости затухания сигналов георадиолокации и индукции с температурой мерзлых грунтов криолитозоны Якутии изучалась в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН. Эксперименты, поставленные в полевых условиях, показали, что явление термосвязи затухания электромагнитных волн, представленных сигналами георадиолокации и индукции, наблюдается не во всей толще вечной мерзлоты, а лишь в слое годовых теплооборотов.

Исследования, выполненные на кафедре геофизики Забайкальского университета и в Забайкальской лаборатории инженерной геокриологии

² Нами применялся комплект антенн кольцевой конструкции диаметром 32 см, работающих на одной из четырех частот 281.25; 562.50; 1125; 2250 кГц.

³ Это один из методов индуктивной геоэлектрики, хотя в нем и не измеряется эффект индукции в чистом виде. Метод разработан сотрудниками Московского геолого-разведочного института (МГРИ) Ю.В. Якубовским, Ф.М. Каменецким и др. С 1960 г. разработкой аппаратуры метода, а также методикой обработки и интерпретации полевых материалов преимущественно стал заниматься Всесоюзный научно-исследовательский институт техники и разведки (ВИТР).

⁴ Работ по этой тематике очень мало. В журнале Международной ассоциации мерзлотоведения “Permafrost and Periglacial Process Permafrost” из 250 публикаций за период 2003–2010 гг. всего 5.6 % приходится на геофизику.

⁵ Авторы не поясняют, что это за метод.

ИМЗ СО РАН, позволили разработать научно-методические основы применения метода ВЭЗ на ранней стадии вызванной поляризации с целью изучения динамики теплового состояния сезонно-многолетней мерзлоты в области интенсивных фазовых переходов поровых растворов [Шестернев и др., 2003].

Благодаря обобщению результатов отечественных и зарубежных лабораторных и полевых экспериментов, удалось синтезировать общую модель, корректно описывающую уравнением логистической регрессии явление термосвязи для достаточно широкого круга характеристик электросейсмоакустических свойств мерзлых дисперсных, полускальных и скальных грунтов всей криолитозоны России [Нерадовский, 2013].

Переориентация методов геофизики в область криопетрофизики с целью изучения температуры, строения и свойств мерзлых грунтов вызвана современной фазой развития науки и производства. Со стороны науки – это необходимое переосмысление существующих теоретических представлений, систематизация, обобщение и объединение с единых системных позиций огромного объема фактического материала, накопленного в геокриологии. Об этом пишет В.П. Мельников с соавторами [2013], заявляя о назревшем моменте перехода науки геокриологии на более высокий содержательный уровень знаний с преобразованием в науку криософии Земли. Со стороны производства – это необходимость добычи, переработки и транспортировки минеральных ресурсов в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, в Арктике и Субарктике. Долговременное промышленное освоение этих территорий немислимо без применения новых технологий изучения мерзлых грунтов, берегающих материально-трудовые ресурсы и, главное, минимизирующих экологические риски загрязнения окружающей среды и криогенные риски нарушения теплового режима криолитозоны в сфере теплового, механического и химического взаимодействия со зданиями и сооружениями. Этим требованиям в полной мере отвечает метод дистанционного среднечастотного индукционного зондирования (далее – метод индукции).

В настоящей работе показан пример практического применения метода индукции на федеральной автотрассе “Амур” (Чита–Хабаровск). Результаты его апробации на этом линейном со-

оружении, как и результаты других полевых экспериментов⁶, вносят свой вклад в реализацию государственной программы научных исследований по приоритетному направлению рационального природопользования⁷.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования методом индукции были включены в состав методов геокриологических исследований ИМЗ СО РАН (в рамках научного сопровождения инженерно-геологических изысканий) для установления причин образования просадок и деформаций на аварийных участках автодороги “Амур” в Забайкальском крае и Амурской области. Цель экспериментов с использованием метода индукции заключалась в научном обосновании его применения для решения практических задач изучения динамики теплового состояния оснований автодорог в ходе проектно-изыскательских работ и мониторинговых исследований. Для этого нужно было решить следующие основные задачи:

- 1) провести опорные параметрические индукционные зондирования в точках термометрии скважин, пробуренных в теле насыпи автодороги;
- 2) выполнить поисковые индукционные зондирования на естественном основании насыпи автодороги;
- 3) вычислить коэффициент затухания амплитуды сигналов индукции в слое годовых теплооборотов до глубины 6–10 м;
- 4) составить матрицу парных значений коэффициента затухания и температуры мерзлых грунтов на глубине 6, 7, 8, 9, 10 м;
- 5) найти уравнения регрессии, устанавливающие количественную связь значений коэффициента затухания и температуры;
- 6) вычислить по уравнениям регрессии значения температур в точках опорной и поисковой сети индукционных зондирований;
- 7) изучить статистику ошибок вычисления температуры по данным индукционных зондирований.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА И УЧАСТКОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследований – грунты слоя годовых теплооборотов сезонномноголетней криолитозоны на Читинском и Амурском участках автодороги “Амур”. Первый участок находится в Мого-

⁶ Эксперименты проведены в лаборатории инженерной геокриологии ИМЗ СО РАН по программам исследований СО РАН, в том числе по программе VIII.77.2 “Криогенные, геологические и физико-химические процессы и их роль в формировании и развитии природных и техногенных систем криосферы”, в рамках проекта VIII.77.2.3 “Воздействие криогенных, геологических и физико-химических процессов на природно-технические системы криолитозоны в условиях изменения климата”.

⁷ Программа включает поиск, разработку и внедрение в производство технологии № 19 (мониторинг и прогноз состояния окружающей среды, предотвращение и ликвидация ее загрязнения) и технологии № 21 (предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера). Нумерация технологий дана по перечню критических технологий (утверждено Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899).



Рис. 1. Обзорная схема мерзлотно-геоморфологического районирования территории Забайкальского края в полосе трассы федеральной автодороги “Амур” [Кондратьев и др., 2010].

Геоморфологические области: 1 – Даурское поднятие, 2 – Восточно-Забайкальская депрессия, 3 – Пришилкинская горнодолинная страна; мерзлотные зоны: 4 – несплошного распространения вечной мерзлоты, 5 – сплошного распространения вечной мерзлоты; 6 – условная граница между мерзлотными зонами; 7 – трасса автомобильной дороги; 8 – Транссиб; 9 – ключевые участки на отдельные километры трассы; 10 – населенные пункты; 11 – ключевые участки ИМЗ СО РАН.

чинском районе на северо-востоке Забайкалья, где преобладают слабохолмистый среднегорный рельеф с абсолютной высотой до 1300 м и межгорные котловины, днища которых расположены на высоте 500–700 м (рис. 1). Участок трассы автодороги проходит по периферии Даурского сводового поднятия и узкой полосе Восточно-Забайкальской депрессии. Далее трасса углубляется в горнодолинную Пришилкинскую страну, а затем вновь возвращается к границе Даурского сводового поднятия и проходит вдоль него в районе ж/д станции “Могоча”. После перехода р. Амазар трасса автодороги вновь выходит на территорию Даурского сводового поднятия.

В геологическом отношении разрез основания автодороги на первом участке представлен гранитами среднего и нижнего палеозоя, среднего архея, комплексом средне-нижнеюрских гранитоидов, останцами осадочных пород. Минералогическое и петрографическое разнообразие пород интрузивного и осадочного генезиса обуславливает высокую изменчивость по площади теплофизических и иных свойств. Сложный рельеф с неравномерным распределением количества летних осадков, времени образования и мощности снежного покрова усиливает изменчивость свойств коренных пород. В результате в Забайкалье сформировалась криолитозона со сложной динамикой мощности и температурного поля по площади и глубине.

Мощность насыпи на первом участке исследований равна 1.2–3.7 м. Мерзлые грунты под насыпью в целом залегают на глубине 5 м. По нашим данным температура на глубине 6–9 м изменяется в диапазоне $-(0.3...1.3)^\circ\text{C}$ при среднем значении $-(0.8 \pm 0.2)^\circ\text{C}$.

Второй участок исследований расположен в Амурской области на юге Дальнего Востока в лесостепной зоне Амуро-Зейской и Зейско-Буреинской равнин. Длина участка 419 км (рис. 2). Мощность насыпи автодороги на этом участке равна 2.0–5.0 м. Мерзлые грунты в основании автодороги встречаются редко и, как правило, на глубине 8–9 м. По нашим данным температура на глубине 5–8 м изменяется от $+3.9$ до -0.8°C .

В геологическом отношении второй участок исследований находится в пределах Амурской мезозойской тектонической депрессии, сложенной изверженными, метаморфическими и осадочными породами. Основанием автодороги служат элювиально-делювиальные, аллювиально-пролювиальные образования, а также аллювий пойм и низких террас мощностью от 3–5 до 10–15 м. Элювий, делювий и пролювий представлены щебнисто-дресвяным материалом с различным по дисперсности заполнителем. В верхней части разреза часто залегают местами заторфованные и перувлажненные суглинки и супеси. Для аллювия характерна сильная изменчивость состава по глубине и площади, но с преобладанием крупнообломочных фракций. Комплекс четвертичных отложений подстилается коренными породами в виде гранитов верхнего палеозоя и средней юры, юрскими песчаниками и верхнеэоценово-нижнечетвертичными песчаниками, аргиллитами, алевролитами.

Предварительный анализ особенностей природных условий и их изменений при строительстве и эксплуатации автодороги позволил на первом участке обосновать выделение 10, на втором – 8 ключевых участков. На их территории были оборудованы стационарные пункты наблюдений

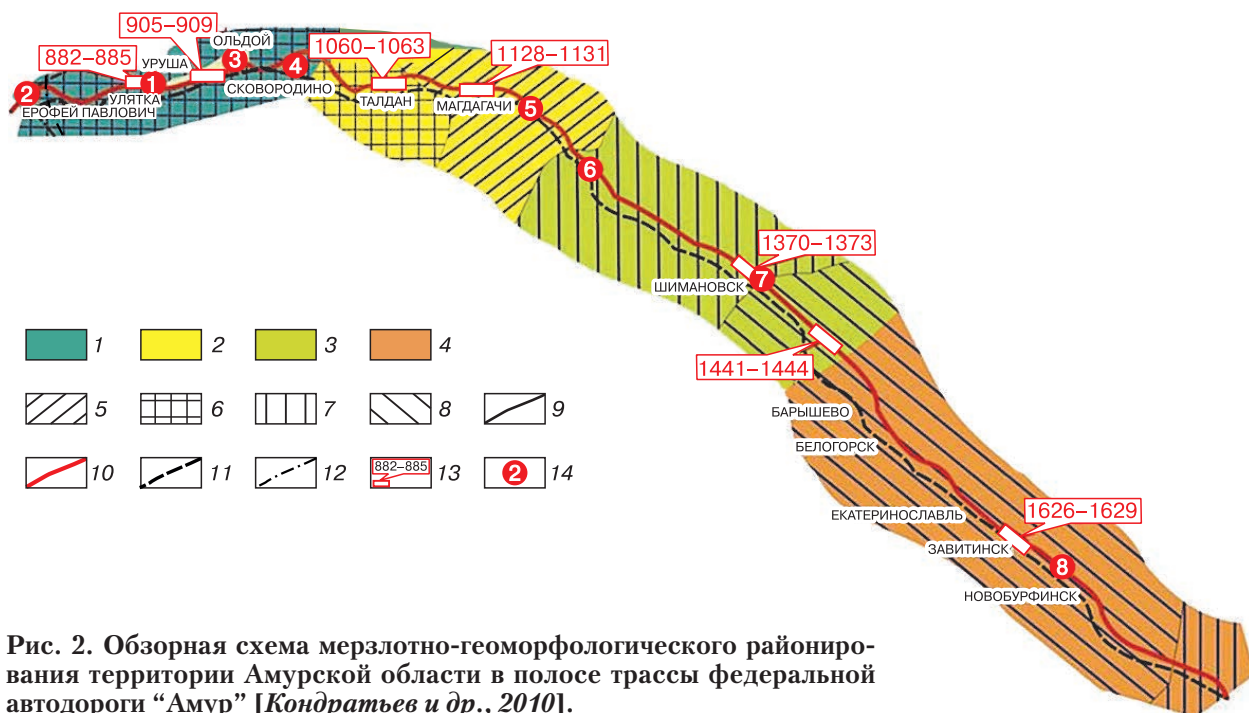


Рис. 2. Обзорная схема мерзотно-геоморфологического районирования территории Амурской области в полосе трассы федеральной автодороги “Амур” [Кондратьев и др., 2010].

Геоморфологические области: 1 – Пришилкинская горно-долинная страна, 2 – Восточно-Забайкальская депрессия, 3 – Амурская депрессия, 4 – Буреинско-Амурская складчато-глыбовая горная страна; *мерзлотные зоны:* 5 – сплошного распространения вечной мерзлоты, 6 – несплошного распространения вечной мерзлоты с островами таликов, 7 – островного распространения вечной мерзлоты, 8 – глубокого сезонного промерзания грунтов; 9 – условная граница между мерзлотными зонами; 10 – трасса автомобильной дороги; 11 – Транссиб; 12 – административная граница; 13 – ключевые участки на отдельные километры трассы; 14 – ключевые участки ИМЗ СО РАН. Ключевые участки на схеме выбраны ИМЗ СО РАН.

за изменением температуры грунтов до глубины 10 м (см. рис. 1, 2).

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Геотермия скважин выполнялась по стандартной методике [ГОСТ 25358–82, 1982] с использованием современных датчиков преобразования температуры марки DS18B20, отградуированных в лаборатории ИМЗ СО РАН с точностью ± 0.5 °С. Информация о температуре автоматически передавалась с датчиков на экран ноутбука и сохранялась до последующей камеральной обработки.

Метод индукции выполнялся по линиям профилей, пересекающих автодорогу через точки режимных скважин термометрии. Длина профилей по 100 м. Расстояние между точками зондирования 25 м. На каждом профиле зондирование выполнялось в пяти точках, пробуренных по обочинам автодороги до глубины 10 м. Тело насыпи автодороги изучалось в одной точке, расположенной возле устья скважины. Боковые примыкания естественного основания автодороги изучались в че-

тырех точках, расположенных по две справа и слева от тела насыпи. Измерения сигналов индукции (значений амплитуд вертикальной и горизонтальной составляющих магнитного поля) проводились аппаратурой “СЭМЗ”⁸ 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 до 30 м. Высота антенн над поверхностью земли была выбрана равной около 1 м.

Принятая схема реализует индуктивное возбуждение вертикальным магнитным диполем насыпных грунтов и грунтов естественного основания. По отношению значений вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_r) составляющих магнитного поля определялись значения эффективного электрического сопротивления (ρ_{ef}) и строились графики этой величины в зависимости от разности – расстояния между антеннами ПРД и ПРМ. Зна-

⁸ Цифровой аналог этой измерительной техники – “КАВ-ЭММ” – выпускается в настоящее время научно-техническим центром радиотехники “Мезон” в Красноярском техническом государственном университете.

чения ρ_{ef} вычислялись по программе А.Е. Каминского "VMD-1D" и относились к точкам нахождения антенны ПРМ. Скорость затухания амплитуд H_z , H_r и их модуля оценивалась путем аппроксимации степенной функцией. Показатель этой функции при достижении максимального разноса 30 м принимался за эмпирическую оценку коэффициента затухания магнитного поля (k) в слое насыпи и ее основания и относился к точке стояния антенны ПРД. Точную ошибку вычисления оценок неизвестных истинных значений k найти невозможно по данным полевого эксперимента. Поэтому она принималась равной погрешности измерений H_z и H_r – в среднем около 4 %.

Результаты зондирований на скважинах показали, что в зависимости от электрического сопротивления разреза эффективная глубина проникновения электромагнитного поля с заданной частотой 1.125 МГц и максимальным разносом антенн до 30 м изменялась от 6 до 10 м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Авторы исследовали связь двух характеристик: коэффициента затухания амплитуды сигналов индукции и температуры мерзлых грунтов. Эта связь ранее установлена авторами в слое годовых теплооборотов криолитозоны Якутии, ниже этого слоя она не наблюдается. В этом верхнем слое криолитозоны непрерывно протекают процессы перераспределения тепла. Особенно они сильны в слое сезонного протаивания–промерзания мощностью до 3 м, где на верхней границе происходит периодическая смена положительных и отрицательных температур с амплитудой до нескольких десятков градусов. Ниже в слое годовых колебаний температур (чаще всего до глубины 10–15 м) отрицательные температуры сохраняются, но их значения могут варьировать от единиц до десятых долей градуса. Такая динамичная картина распределения значений температурного поля по глубине и, в существенно меньшей степени, по латерали генерирует сложнейшие энергетические взаимодействия или, точнее сказать, согласованную пространственно-временную динамику поведения геолого-геофизических характеристик мерзлых грунтов. Причем роль температуры в этих взаимодействиях в подавляющем большинстве случаев доминирует над мерзлотно-грунтовыми факторами. Именно благодаря этому мы имеем возможность изучать в полевых условиях термосвязь характеристик геофизических полей.

Теоретическое осмысление результатов прежде выполненных экспериментов показывает, что, несмотря на разную физическую природу температурного и электромагнитного полей, законы их распространения по глубине одинаковы. А именно, амплитуды колебаний температурных и электромагнитных волн, представленных в настоящей работе сигналами индукции, нелинейно и моно-

тонно затухают по глубине, подчиняясь тому или иному уравнению трансцендентных функций. Об этом говорят хорошо известные законы Фурье из теории теплопроводности [Достовалов, Кудрявцев, 1967] и законы Максвелла из теории электродинамики [Альпин и др., 1985].

Таким образом, связь характеристик затухания температурных и электромагнитных полей предсказана теоретически еще в прошлом веке фундаментальными исследованиями в области физики. Наши исследования подтверждают эти предсказания в частном порядке. Причем, как уже говорилось выше, не для всей толщи вечномерзлых пород, а только для слоя годовых теплооборотов. Постояннодействующие в этом слое циклические процессы перераспределения потоков тепловой энергии в зависимости от характера теплообмена с дневной поверхностью инициируют в ту или иную сторону сдвиг температурного режима, порождающий соответствующие изменения фазового состава мерзлых грунтов. В свою очередь изменение структуры, свойств и соотношения в минеральном скелете мерзлых грунтов количества льда, связанной незамерзшей воды и газов генерирует *согласованные изменения температуры и базовых характеристик электрофизических свойств*: электросопротивления и диэлектрической проницаемости. В конечном счете эти характеристики регулируют скорость затухания электромагнитного поля в слое годовых теплооборотов. И хотя поле распределения электросопротивления по глубине и латерали может носить любой характер, тем не менее в каждой точке пространства оно находит свое выражение в интегральной характеристике – коэффициенте затухания. При этом общий рост среднего электросопротивления мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов вызывает снижение коэффициента затухания электромагнитных волн и наоборот. Именно поэтому мы видим в свернутом виде (в метрике средних значений) процесс наследственной передачи пространственной динамики электросопротивления на иной информационный уровень в одной и той же форме – монотонно-нелинейном убывании по глубине амплитуды как сигналов индукции, так и других сигналов электромагнитных зондирований.

Если говорить по существу, то все эти сигналы, как и температура, с разных сторон и с разной точностью, но одинаково достоверно фиксируют текущий температурный режим одной из криогенных систем Земли – мерзлых грунтов. Такое понимание чрезвычайно важно и ново, так как оно открывает путь к более углубленному и полному изучению динамики теплового состояния мерзлых грунтов в совместном применении метода полупроводниковой термометрии скважин, метода индукции и других методов электромагнитных зондирований.

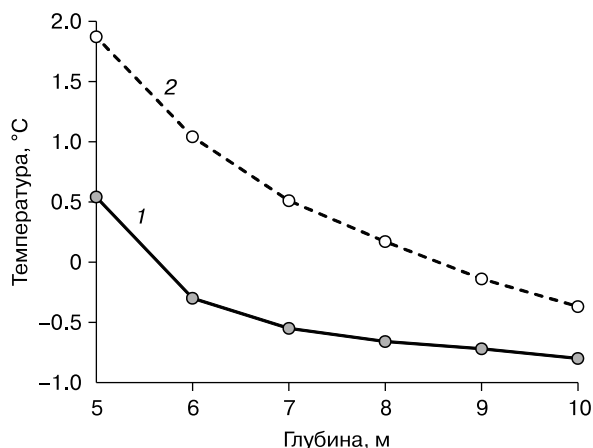


Рис. 3. Графики средних значений температуры мерзлых грунтов по данным режимной термометрии по трассе федеральной автодороги “Амур” в сентябре 2013 г.:

1 – Забайкальский край; 2 – Амурская область.

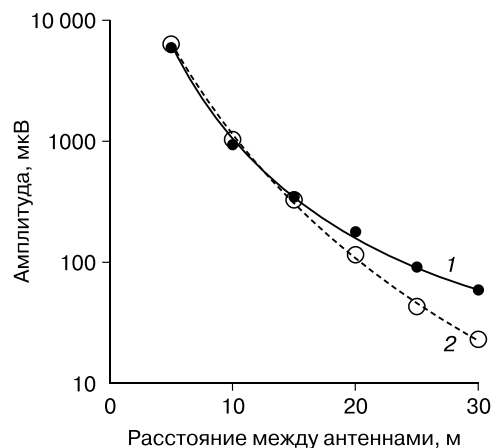


Рис. 4. Графики средних значений сигналов индукции – амплитуд затухания модуля вертикальной и горизонтальной составляющих магнитного поля по данным зондирования методом индукции в сентябре 2013 г. в зависимости от расстояния между приемно-передающими антеннами:

1 – Забайкальский край; 2 – Амурская область.

Рассмотрим графики средних значений температуры, построенные с глубины 5 м, где амплитуда годовых колебаний температуры не превышает одного градуса (рис. 3), и графики средних значений модуля амплитуд H_z и H_r (рис. 4). Из сопоставления графиков видно, что в Забайкалье мерзлое основание автодороги со средней температурой на глубине 5–10 м минус 0.2 °С имеет более низкую скорость затухания магнитного поля ($k_{MOD} = -2.561 \text{ м}^{-1}$), чем немерзлое основание в Амурской области ($k_{MOD} = -3.143 \text{ м}^{-1}$), где аналогичная температура равна +1.1 °С. Разность в

оценках коэффициента затухания k_{MOD} невелика (20 %), но достаточна для изучения в различных инженерно-геокриологических условиях пространственной и временной динамики теплового состояния основания автодороги с фиксацией перехода мерзлого состояния в талое или немерзлое состояние.

Главный научный результат показан в виде поля корреляций k_{H_z} и температуры мерзлых грунтов на глубине 6–10 м (рис. 5). Этот материал на

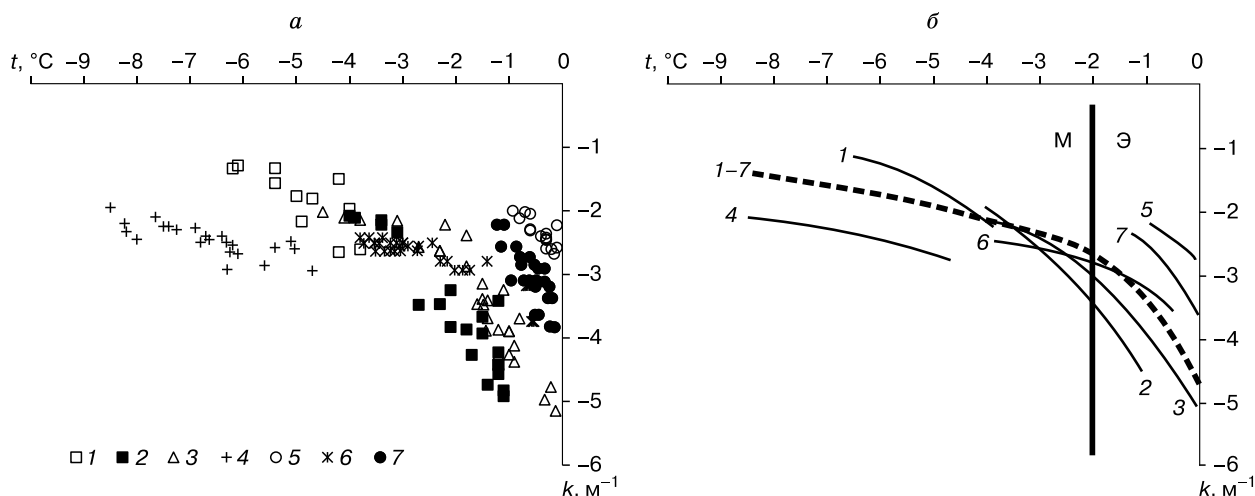


Рис. 5. Сводное поле корреляций (а) и графиков полиномов (б) на участках монотонности (М) и экстремальности (Э) термосвязи коэффициента затухания вертикальной составляющей магнитного поля в слое годовых теплооборотов криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока.

1 – Дом быта в пос. Черский; 2 – Амуро-Якутская автомагистраль; 3 – ж/д “Томмот–Кердем–Нижний Бестях”; 4 – место рождения Кючус; 5 – пески Бестяхской террасы долины р. Лены; 6 – автодорога “Виллой”; 7 – автодорога “Амур”. Ост. пояснения см. в тексте.

турных экспериментов получен в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока на территории Республики Саха (Якутия), Забайкальского края и Амурской области. Сборка разрозненных во времени и пространстве материалов экспериментов в одно целое говорит о том, что региональные географо-климатические, инженерно-геокриологические и другие условия эксплуатации инженерных сооружений накладывают индивидуальный отпечаток на характер затухания вертикальной составляющей магнитного поля в мерзлых грунтах разного возраста, генезиса и состава. При этом криогенное разнообразие, модулируемое тепловым режимом слоя годовых теплооборотов, выражается разным уровнем фоновых (средних по объекту исследования) значений k_{H_z} . Вследствие этого приемлемые по точности результаты вычисления температуры по данным метода индукции будут обеспечивать объектно-локальные модели термосвязи затухания сигналов индукции, привязанные к конкретным условиям изысканий, строительства и эксплуатации одного или серии зданий и сооружений.

В рассматриваемом случае накопление тепловой энергии в слое годовых теплооборотов приводит к согласованному росту температуры мерзлых грунтов и k_{H_z} . На фоне этой закономерности (график 1–7) обнаруживаются две особенности (см. рис. 5, б): монотонность с медленным ростом затухания при относительно низких и умеренных температурах (участок “М”) и экстремальность с быстрым ростом затухания при высоких

температурах в области интенсивных фазовых переходов льда в воду (участок “Э”). Тем самым в главных чертах доказана выдвинутая нами гипотеза о региональной повторяемости явления термосвязи затухания сигналов индукции в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Механизм термосвязи затухания сигналов индукции обусловлен непрерывной перестройкой в слое годовых теплооборотов структуры, изменением свойств и соотношения количества незамерзшей воды, льда и газа, происходящих в открытых неравновесных термодинамических системах – массивах мерзлых грунтов.

Перейдем к рассмотрению производственной стороны выполненных экспериментов, т. е. к результатам апробации метода индукции в оценке пространственной динамики теплового состояния основания автодороги “Амур”. Расчет по исходным данным (табл. 1) корреляционной матрицы (табл. 2) показывает, и это ранее не было известным, что решение этой задачи возможно в расширенном виде. Под этим понимается вычисление температуры грунтов не только на глубине залегания нижней границы слоя годовых теплооборотов, но и на других глубинах в пределах этого слоя.

Проанализируем содержание табл. 2 и поищем в ней парные связи переменных с относительно высокими корреляциями. Анализ начнем с первого столбца – переменной Z – глубины зондирования. Максимум ее корреляции (–0.59) находим с переменной k_{H_z} , несущей информацию о затухании магнитного поля в вертикальном на-

Таблица 1. Матрица исходных данных по автодороге “Амур”

Район работ	км трассы	Номер скв.	Z, м	k, м ⁻¹			t по глубине скважин, °С					t по слоям разреза, °С		
				k_{H_z}	k_{H_r}	k_{MOD}	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_T	t_M	t_{TM}
1	531	10	8.5	2.567	1.617	2.893	-0.45	-0.64	-0.86	-1.02	-1.15	7.41	-0.75	-0.37
1	538	9	7.1	2.731	1.731	2.987	-0.28	-0.52	-0.61	-0.67	-0.79	4.02	-0.61	-0.05
1	548	8	8.3	3.377	2.425	3.406	5.37	0.20	-0.19	-0.21	-0.269	8.61	-0.21	5.65
1	559	7	7.3	2.221	1.369	2.680	-0.82	-0.99	-1.09	-1.15	-1.23	3.83	-0.99	-0.77
1	653	4	7.9	3.117	2.343	3.305	-0.20	-0.26	-0.33	-0.45	-0.45	7.90	-0.30	-0.17
1	653	4	7.9	2.910	2.033	3.144	-0.20	-0.26	-0.33	-0.45	-0.45	7.90	-0.30	-0.17
1	690	3	6.4	3.099	1.893	3.160	-0.52	-0.58	-0.62	-0.64	-0.96	6.82	-0.62	-0.20
1	690	3	6.4	3.099	1.893	3.160	-0.33	-0.42	-0.49	-0.54	-0.72	4.25	-0.49	-0.20
1	696	2	7.5	3.195	1.744	3.143	-0.06	-0.19	-0.24	-0.46	-0.50	3.91	-0.24	0.07
2	802	2	10.0	2.853	1.868	3.073	-0.43	0.45	-0.52	-0.58	-0.77	11.28	-0.44	-0.41
2	892	1	5.7	3.638	2.255	3.433	-0.14	-0.26	-0.44	-0.47	-0.51	8.65	-0.35	-0.11
2	1006	4	6.0	3.835	2.388	3.528	1.59	0.71	0.12	-0.08	-0.14	2.265	-0.11	1.86
2	1018	5	6.0	3.823	2.569	3.575	0.89	0.83	0.43	-0.14	-0.23	1.415	-0.19	1.11
2	1220	6	6.0	4.043	2.669	3.664	2.52	2.01	1.97	1.95	1.76	9.87	0.00	3.29

Примечание. 1 – Забайкальский край; 2 – Амурская область; Z – эффективная глубина проникновения электромагнитного поля в Землю, м; k_{H_z} , k_{H_r} , k_{MOD} – коэффициенты затухания амплитуд вертикальной, горизонтальной составляющих магнитного поля и их модуля, м⁻¹; t_6 – t_{10} – температура грунтов на глубине 6–10 м, °С; t_T – средняя температура талых насыпных грунтов и грунтов сезонноталого слоя, °С; t_M – средняя температура мерзлых грунтов в слое на глубине 6–10 м, °С; t_{TM} – средняя температура нерасчлененного слоя талых и мерзлых грунтов, °С.

Таблица 2. Корреляционная матрица исходных данных по автодороге “Амур”

Переменные	Z	k_{H_z}	k_{H_r}	k_{MOD}	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_T	t_M	t_{TM}
Z	1.00											
k_{H_z}	-0.59	1.00										
k_{H_r}	-0.39	0.91	1.00									
k_{MOD}	-0.50	0.98	0.97	1.00								
t_6	-0.48	0.83	0.77	0.81	1.00							
t_7	-0.23	0.80	0.79	0.80	0.92	1.00						
t_8	-0.41	0.81	0.78	0.80	0.93	0.94	1.00					
t_9	-0.38	0.76	0.74	0.76	0.90	0.91	0.98	1.00				
t_{10}	-0.37	0.77	0.77	0.77	0.91	0.90	0.98	0.99	1.00			
t_T	0.49	-0.03	0.14	0.06	-0.05	0.18	0.13	0.25	0.24	1.00		
t_M	-0.26	0.88	0.88	0.91	0.77	0.80	0.78	0.74	0.78	0.11	1.00	
t_{TM}	-0.10	0.58	0.66	0.62	0.62	0.61	0.58	0.60	0.62	0.15	0.60	1.00

Примечание. Пояснения см. в табл. 1.

правлении. Переменная k_{H_r} в меньшей степени связана с переменной Z, так как несет информацию о затухании магнитного поля, распространяющегося в горизонтальном направлении в верхнем воздушном полупространстве и в некоторой части нижнего грунтового полупространства. Совместное использование k_{H_z} и k_{H_r} дает выигрыш в полноте информации о затухании магнитного поля в основании автодороги. Поэтому переменная k_{MOD} , вычисляемая как квадратный корень из суммы квадратов k_{H_z} и k_{H_r} , использована для расчета температуры мерзлых грунтов основания по данным метода индукции.

Интересно отметить, что, судя по всплескам корреляций, на глубину зондирования оказывают значимое влияние температура талых насыпных грунтов (переменная t_T) и частично температура талых грунтов основания автодороги на глубине 6 м (переменная t_6).

Рассмотрим переменную k_{MOD} . Главную на нее информационную нагрузку с максимумом корреляции 0.91 оказывает переменная t_M – средняя температура мерзлых грунтов на глубине 6–10 м. Средняя температура нерасчлененного слоя талых грунтов насыпи и основания автодороги (переменная t_T) не влияет на k_{MOD} , несмотря на то, что талые грунты сильнее поглощают электромагнитную энергию, чем мерзлые грунты. Связь k_{MOD} с фиксированными значениями температуры на глубине 6–8 м (переменные t_6 и t_8) находится на высоком уровне корреляции (0.8). Ниже этой глубины виден едва значимый спад корреляции. Этот признак говорит о том, что хотя энергетическое взаимодействие магнитного поля с грунтами продолжается, но начинает терять силу.

Вычислить температуру грунтов на разных глубинах было нетрудно. Для этого, не обращая внимания на соблюдение корректности формы

связи переменных k_{MOD} и t_6-t_{10} и ставя единственной целью достижение максимума точности вычислений, применялись полиномиальные функции 3-й степени. Не приводя их уравнений, ограничимся анализом результатов их применения. Статистика ошибок вычислений из 70 определений (табл. 3, 4), полученная по выборке из 12 скважин, с уровнем доверительной вероятности 95 % свидетельствует, что разброс средней ошибки вычисления температуры не выходит за границу $\pm(0.13...0.18)$ °С. Разброс ошибок единичных вычислений в 70 % случаев не превышает ± 0.62 °С. Из этой статистики следует, что в дальнейшем изучении методом индукции тепловой динамики оснований автодорог надо опираться не на единичные определения значений k_{MOD} в одном азимуте, а на средние значения k_{MOD} , получаемые по серии зондирований в разных азимутах в окрестности точек поисковой или мониторинговой сети геолого-геофизических наблюдений.

Впрочем, единичные определения k_{MOD} тоже пригодны, но не на стадии диагностики, а на стадии мониторинга при отслеживании сезонных или межгодовых изменений уровня и направленности температурного поля оснований автодорог. Доказательный пример этому показан на рис. 6. Из него видно, что несмотря на локальные температурные вариации с амплитудой $\pm(0.2...0.5)$ °С, в основании автодороги “Амур” наблюдается общий закономерный рост температуры от -0.8 °С в Забайкальском крае до нуля в Амурской области. Согласованность данных геофизики и геотермии скважин в оценке относительных изменений теплового состояния основания автодороги на глубине 6–10 м высока как в региональном масштабе, так и в местных особенностях. По коэффициенту корреляции температурных рядов мера согласованности составляет 0.94.

Таблица 3. Ошибки вычисления температуры грунтов основания автодороги “Амур” по данным метода индукции

Район работ	Номер скв.	t по данным скважин, °С					t по данным геофизики, °С					Ошибки вычисления t , °С				
		6 м	7 м	8 м	9 м	10 м	6 м	7 м	8 м	9 м	10 м	6 м	7 м	8 м	9 м	10 м
1	10	-0.5	-0.6	-0.9	-1.0	-1.2	-0.3	-0.3	-0.5	-0.6	-0.8	-0.1	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4
1	9	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.3	-0.2	-0.5	-0.6	-0.8	0.0	-0.3	-0.1	-0.1	0.0
1	8	0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.3	0.1	0.0	-0.3	-0.4	-0.5	-0.3	0.2	0.2	0.2	0.3
1	7	-0.8	-1.0	-1.1	-1.2	-1.2	-0.8	-1.1	-1.3	-1.3	-1.4	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2
1	4	-0.2	-0.3	-0.3	-0.5	-0.5	-0.2	-0.2	-0.6	-0.6	-0.7	0.0	-0.1	0.2	0.2	0.3
1	4	-0.2	-0.3	-0.3	-0.5	-0.5	-0.3	-0.3	-0.6	-0.6	-0.8	0.1	0.0	0.3	0.2	0.3
1	3	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-1.0	-0.3	-0.3	-0.6	-0.7	-0.8	-0.2	-0.3	0.0	0.0	-0.2
1	3	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.7	-0.3	-0.3	-0.6	-0.7	-0.8	0.0	-0.1	0.1	0.1	0.1
1	2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.5	-0.5	-0.3	-0.3	-0.6	-0.6	-0.8	0.3	0.1	0.3	0.2	0.3
2	2	-0.4	0.5	-0.5	-0.6	-0.8	-0.3	-0.3	-0.5	-0.6	-0.8	-0.1	0.7	0.0	0.0	0.0
2	1	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	0.3	0.1	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1
2	4	1.6	0.7	0.1	-0.1	-0.1	0.9	0.7	0.3	0.1	0.0	0.7	0.1	-0.2	-0.2	-0.2
2	5	0.9	0.8	0.4	-0.1	-0.2	1.4	1.0	0.7	0.5	0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.6	-0.6
2	6	2.5	2.0	2.0	2.0	1.8	2.5	2.0	1.6	1.4	1.2	0.1	0.1	0.4	0.5	0.6

Примечание. 1 – Забайкальский край; 2 – Амурская область. Несовпадение результатов вычисления ошибок с исходными данными термометрии скважин и геофизики связано с автоматическим округлением этих данных в ту или иную сторону с точностью 0.1 °С.

Результат частной диагностики динамики теплового состояния основания автодороги “Амур” в Забайкальском крае показан по одному из поперечных термостворов на километре 559 + 785, где пробурена опорная скважина режимной термометрии. На рис. 7 показан геотермический разрез, построенный по данным термометрии скв. № 7 и метода индукции. Анализ разреза показывает, что мерзлые грунты основания автодороги залегают от поверхности насыпи на глубине 3.5 м с температурой -0.4 °С. Начиная с глубины 7.3 м, где залегают скальные грунты (граниты), температура ниже -1 °С. На расстоянии 25 м от оси насыпи температура резко повышается и на глубине 6 м достигает -(0.3...0.4) °С. Разница по отношению к

точке скв. № 7 в среднем составляет 0.8–0.9 °С с градиентом 0.034 °С/м. Почему так происходит, трудно понять. Однако если принять во внимание просадки дорожного полотна и данные радиоимпедансного зондирования, полученные в 2012 г., то один из вариантов объяснения сравнительно низкой температуры мерзлых грунтов под насыпью автодороги на фоне высоких температур ее боковых примыканий состоит в пересечении трассой автодороги льдистых грунтов в заболоченной пойме долины руч. Гурьев.

Таблица 4. Вероятностная структура ошибок вычисления температуры грунтов основания автодороги “Амур” на глубине 6–10 м

Категория точности вычисления температуры	Интервал ошибки, °С	Вероятность, %	
		Забайкальский край (N = 45)	Амурская область (N = 25)
Высокая	±(0.0–0.2)	67	52
Средняя	±(0.2–0.5)	33	24
Низкая	±(0.5–1.0)	Нет	24
Очень низкая	Более ±1.0	»	Нет

Примечание. N – число определений значений температур.

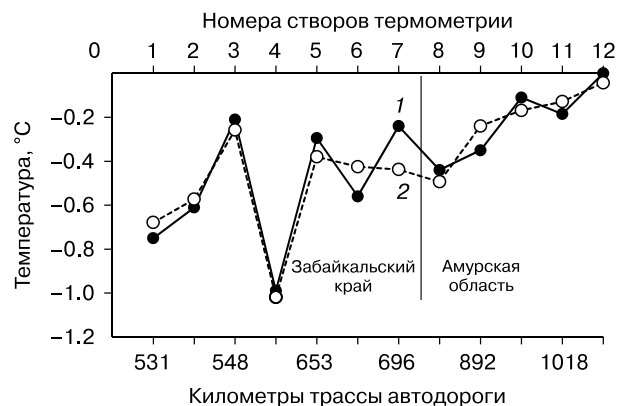


Рис. 6. График средней температуры на глубине 6–10 м. Диагностическая стадия мониторинга пространственной динамики теплового состояния основания автодороги “Амур” осенью 2013 г.

1 – термометрия скважин; 2 – метод индукции.

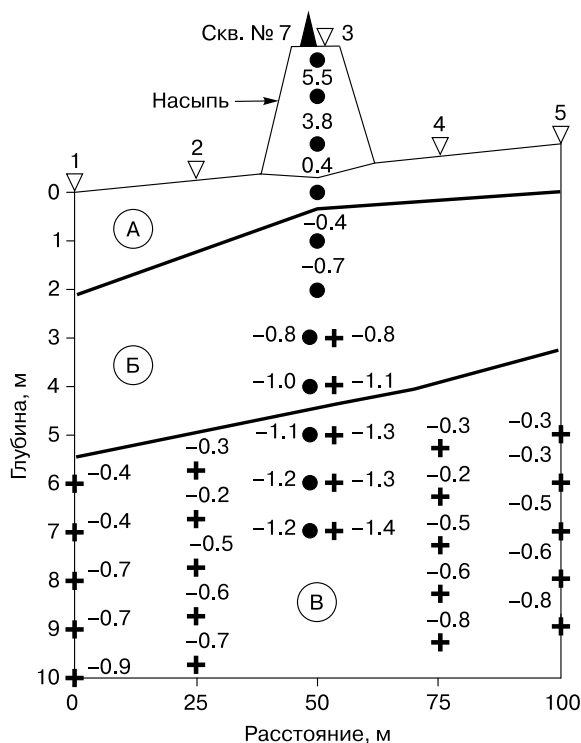


Рис. 7. Геотермический разрез насыпи и основания автодороги “Амур” в Забайкальском крае по термоствору на километре 559 + 785.

А – слой сезонноталых грунтов; Б – слой мерзлых древесно-щебенистых грунтов коры выветривания коренных пород; В – слой относительно сохранных коренных пород (гранитов). Крестики и кружки с цифрами означают соответственно точки определений значений температуры (°С) по данным термометрии скв. № 7 и метода индукции (точки зондирования 1–5).

Такие детали аномальных особенностей температурного поля важны с точки зрения информационного обеспечения мер безопасной и устойчивой эксплуатации линейных сооружений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованиями, выполненными методом индукции на автодороге “Амур”, установлено существование термосвязи характеристик скорости затухания сигналов индукции в слое годовых теплооборотов прерывисто-островной криолитозоны Забайкальского края и Амурской области. Полученные результаты в совокупности с ранее полученными данными в сплошной криолитозоне Якутии и с результатами других исследователей в иных регионах криолитозоны России доказывают физическую и пространственно-временную общность явления термосвязи не только характеристик скорости затухания сигналов индукции и георадиолокации, но и других характеристик электросейсмоакустических свойств мерзлых грунтов.

Производственный аспект результатов исследований состоит в верификации точности вычисления температуры мерзлых грунтов по данным метода индукции в сравнении с эталонным методом полупроводниковой геотермии скважин. Достигнутая точность удовлетворяет требованиям проектно-изыскательских и мониторинговых работ на стадиях диагностики и контроля динамики теплового состояния мерзлых оснований трасс линейных сооружений. Максимум геолого-экономической эффективности методики электромагнитной оценки температуры мерзлых грунтов, испытанной на автодороге “Амур”, достигается при функционировании объектно-локальных сетей долговременного температурного мониторинга.

Результаты исследований использованы ОАО “Иркутскиипродорнии” для разработки мер по нейтрализации процессов просадок и деформаций на автодороге “Амур”.

Литература

- Альпин Л.М. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике: Учеб. для вузов / Л.М. Альпин, Д.С. Даев, А.Д. Каринский. М., Недра, 1985, 407 с.
- Афанасенко В.Е., Бойков С.А., Петрухин Б.П. Изучение теплового состояния пород в долине р. Кувет электроразведочными методами // Геокриологические исследования / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1991, с. 146–150.
- Вешев А.В. Электромагнитное профилирование / А.В. Вешев, В.Г. Ивочкин, Г.Ф. Игнатъев. Л., Недра, 1971, 216 с.
- ГОСТ 25358-82. Грунты. Метод полевого определения температуры. М., Изд-во Госкомитета СССР по делам строительства, 1982, 14 с.
- Достовалов Б.Н. Общее мерзлотоведение / Б.Н. Достовалов, В.А. Кудрявцев. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, 404 с.
- Емельянов Е.И., Бондаренко В.М. Определение температуры многолетнемерзлых пород в слое годовых теплооборотов методом высокоразрезающего электрического зондирования // Промышленное и гражданское строительство, 2013, № 11, с. 18–21.
- Кондратьев В.Г., Соболева В.В., Палкин Д.Д. Инженерно-геокриологические аспекты обеспечения безопасности федеральной автодороги “Амур” Чита–Хабаровск // Мир дорог, 2010, № 51, с. 2–4.
- Красовский А.Г. Применение метода ДЭМП для изучения многолетнемерзлых пород // Тр. ПНИИИС. Т. VI. Геофизические методы исследований при изысканиях в строительстве. М., 1971, с. 133–149.
- Красовский А.Г. Картирование многолетнемерзлых пород с помощью метода дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП) // Вторая Междунар. конф. по мерзлотоведению: Докл. и сообщ. Вып. 6. Основы геокриологической съемки и прогноза. Якутск, Кн. изд-во, 1973, с. 97–100.
- Мельников В.П., Геннадик В.Б., Брушков А.В. Аспекты криософии: криоразнообразие в природе // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 2, с. 3–11.
- Нерадовский Л.Г. Теоретическое обоснование и экспериментальное доказательство связи температуры с геофизическими характеристиками мерзлых пород и грунтов: Итоги

диссертационных исследований в инженерной геологии, мерзлотоведении и грунтоведении / Л.Г. Нерадовский. Saint-Louis, MO, Publishing House "Science and Innovation Center", 2013, 118 с.

Ним Ю.А. Импульсная электроразведка криолитозоны / Ю.А. Ним, А.В. Омеляненко, В.В. Стогний / Под ред. В.Н. Ефремова. Новосибирск, Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1994, 188 с.

Петровский А.А., Достовалов Б.Н. Первые опыты просвечивания вечной мерзлоты электромагнитными волнами // Тр. Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1947, т. 5, с. 121–160.

Стогний Вас.В. Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии / Вас.В. Стогний. Якутск, Изд-во ООО "Академия", 2003, 124 с.

Шестернев Д.М. Исследование криолитозоны методом РСВП / Д.М. Шестернев, А.П. Карасев, В.В. Оленченко. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2003, 238 с.

Lewkowicz A.G., Etmüller B., Smith S.L. Characteristics of discontinuous permafrost based on ground temperature measurements and electrical resistivity tomography Southern Yukon, Canada // Permafrost and Periglacial Processes, 2011, vol. 22, No. 4, p. 320–342: Article first published online: 8 JUN 2011, doi: 10.1002/ppp.703.

Seguin M.K. Temperature-electrical resistivity relationship in continuous permafrost at Purtunq, Ungava Peninsula // Proc. of the Third Intern. Conf. on Permafrost, NRC Canada, Ottawa, 1978, vol. 1, p. 137–144.

*Поступила в редакцию
11 августа 2014 г.*