

Л.Г. Нерадовский**ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
МЕТОДА ИНДУКЦИИ**

На примере крупного линейного сооружения, построенного в криолитозоне Якутии, впервые показана возможность изучения на разной глубине в пределах слоя годовых теплооборотов динамики теплового состояния мерзлых грунтов методом индукции. В общих чертах описана методика прогноза температурного поля, рассмотрены примеры прогноза и проанализированы ошибки прогноза в сравнении с данными термометрии скважин.

Ключевые слова: мерзлые грунты, температура, электросопротивление, затухание, термометрия скважин, метод индукции, корреляция.

Введение

Актуальность изучения термометрических¹ возможностей метода индукции² объясняется требованиями рационального природопользования в криолитозоне России. Эта проблема в одном из ее аспектов, ориентирует наше научное сообщество в поиске и разработке ресурсосберегающих и неразрушающих технологий контроля и прогноза динамики теплового состояния мерзлых оснований зданий и сооружений. Обозначенную проблему невозможно решить методом термометрии скважин из-за высокой стоимости метода, нарушение им экологии окружающей среды и, что немаловажно, природного температурного режима мерзлых грунтов. Эти недостатки устраняются при совместном применении метода термометрии скважин с методом индукции. Этот метод, как показывают многолетние эксперименты, проведенные в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, отличается быстрым, экономичным и экологически чистым изучением динамики теплового состояния

мерзлых грунтов. Причем, в наиболее значимой для инженерных приложений сфере механического и теплового взаимодействия мерзлых грунтов со зданиями и сооружениями, т.е. в слое годовых теплооборотов (СГТ). Однако термометрические возможности метода индукции во многом остаются неизученными и восполнению этого пробела посвящена настоящая статья.

Цели и задача исследований

Цель настоящей статьи заключается в частном доказательстве термометрических возможностей метода индукции применительно для потребностей стройиндустрии, горнодобывающей промышленности, коммунального хозяйства и экологии на стадиях проектно-изыскательских и мониторинговых работ. Для достижения цели нужно было решить одну главную задачу, а именно, изучить корреляционные связи между характеристиками температурного поля и характеристиками электрических свойств мерзлых грунтов по данным параметрических зондирований методом индукции в точ-

¹ С точки зрения изучения физических предпосылок количественной приблизительно, но достоверной оценки температуры мерзлых грунтов, не затрагивая организационно технических вопросов метрологического обеспечения процесса получения этих оценок.

² Один из методов геоэлектрики – наземный метод дипольного среднечастотного индуктивного электромагнитного зондирования.

ках скважин режимной термометрии, пробуренных на участке трассе ж/д «Томмот-Кердем-Н-Бестях».

Объект исследований и его изученность

Участок научных исследований расположен на Лено-Амгинского междуречье обширной Центрально-Якутской равнины. Большая часть участка находится в пределах так называемого «ледового комплекса», ареалом которого являются преимущественно разновысотные Эмильская, Маганская и, в меньшей степени, Абалахская и Тунгюлюнская террасы р. Лены. В геологическом отношении разрез «ледового комплекса» сложен 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 пронизаны залежами подземного льда повторно-жильного генезиса. Подробное описание климатических условий, геологического строения и геокриологических особенностей Лено-Амгинского междуречья находится в работе П.А. Соловьева [8].

Методика измерений, обработки и интерпретации экспериментальных данных

Термометрия скважин выполнялась по стандартной методике [3] с использованием датчиков преобразования температуры DS18B20, отградуированных с точностью 0,01 °С.

Метод индукции выполнялся по линиям створов скважин режимной термометрии, пересекающих трассу ж/д,

а также по профилям, где бурение режимных скважин не было предусмотрено. Измерения сигналов индукции (значений амплитуд вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_r) магнитных составляющих электромагнитного поля) проводились аппаратурой «СЭМЗ» на частоте 1,125 МГц. Использовалась схема разнесения с шагом 5 м приемной антенны от неподвижной излучающей антенны на расстояние (разнос АО) до 30 м. Высота антенн над поверхностью земли была выбрана равной около одного метра.

Схема измерений реализует индуктивное 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 геоэлектрики и вместе с тем выполнить сравнительный анализ теоретических и опытных значений характеристик, описывающей скорость затухания электромагнитного поля. Оставалось при цифровой обработке сигналов индукции ограничиться вычислением значений эффективного электрического сопротивления (ρ_{ef}), построением графиков этой характеристики и качественным анализом формы ее графика в зависимости от разнosa (расстояния между приемной и излучающей антеннами) соответствующего глубине зондирования. Значения (ρ_{ef}) вычислялись по отношению H_z/H_r магнитного поля. Для этого использовался компьютерный калькулятор А.Е. Каминского. Вычисленные ρ_{ef} относились к точкам нахождения приемной антенны.

Показатель степенной функции³ аппроксимирующей случайные амплитудные вариации H_z/H_r и модуля H_z

³ 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.

и H_r , принимался за эмпирическую оценку коэффициента затухания (k). Эта характеристика крайне важна, так как несет информацию о процессе затухании электромагнитной волны, представленной сигналами индукции в нерасчлененном слое насыпи ж/д и ее естественного основания. Найденные эмпирические оценки k относились к точке стояния излучающей антенны. 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%.

Интерпретация результатов зондирования методом индукции выполнялась путем сопоставления с литологическими и геокриологическими колонками буровых скважин графиков ρ_{ef} в зависимости от разноса АО, а также графиков амплитуд сигналов индукции. Благодаря этому удалось установить, что эффективная глубина проникновения электромагнитного поля на частоте 1,125 МГц при разносе АО = 30 м и в зависимости от сопротивления геоэлектрического разреза (сотни – тысячи омметров) изменялась от 6–8 до 10–15 м.

Комплексный статистический анализ результатов интерпретации сигналов индукции выполнялся программой «Stadia» с учетом рекомендаций и сове-

тов А.П. Кулаичева [5], а также средствами редактора электронных таблиц Microsoft Excel.

Обсуждение результатов

Результаты интерпретации представляют собой совокупность экспериментальных данных, состоящую из 25 значений пяти переменных, полученных в точках скважин⁴: 1) t_{sr} – средняя температура мерзлых грунтов ниже сезонноталого слоя до глубины 10 м; 2) t_z – температура мерзлых грунтов на глубине 10 м; 3) ρ_{ef} – среднее по геоэлектрическому разрезу эффективное электросопротивление мерзлых грунтов; 4) $k_{Hz/Hr}$ – коэффициент затухания сигналов индукции по отношению H_z/H_r ; 5) k_{MOD} – тоже, по модулю H_z и H_r .

Первая группа из переменных t_{sr} и t_z , характеризует температурное поле мерзлых грунтов в СГТ. Вторая группа из переменных ρ_{ef} , $k_{Hz/Hr}$, k_{MOD} , представляет электрофизические свойства мерзлых грунтов.

Разведочный анализ выборочной совокупности обнаружил ее неоднородность, связанную с включением значений переменных, полученных в мерзлых грунтах разного гранулометрического состава и льдистости. После разбиения выборки на однородные кластеры и устранения кластеров с небольшим числом определений аномальных значений переменных стало

Таблица 1

Матрица непараметрических корреляций

Переменные	t_{sr}	t_z	k_{MOD}	$k_{Hz/Hr}$	ρ_{ef}
t_{sr}	1,000				
t_z	0,954	1,000			
k_{MOD}	-0,780	-0,768	1,000		
$k_{Hz/Hr}$	-0,341	-0,317	0,487	1,000	
ρ_{ef}	-0,674	-0,626	0,606	0,468	1,000

⁴ Температура и электросопротивление мерзлых грунтов определялись в °С и омметрах, а затухание сигналов индукции в м⁻¹.

понятным, что между исследуемыми переменными существует нелинейная связь, ранее скрытая в исходных данных. Вычисленная по скорректированным исходным данным матрица корреляции (табл. 1) показала высокий и средний уровень парных корреляций для всех переменных, за исключением переменной $k_{Hz/Hr}$. Эта характеристика затухания сигналов индукции оказалась малочувствительной к изменению температуры и электросопротивления мерзлых грунтов и поэтому была устранена из дальнейшего статистического анализа.

Максимально высокий, и этого следовало ожидать, уровень корреляции наблюдается у характеристик температурного поля, показывая, что рост средней температуры мерзлых грунтов в СГТ сопровождается ростом температуры на глубине 10 м. С ростом температуры тесно связано снижение значений ρ_{ef} . Эта базовая характеристика электрических свойств мерзлых грунтов в свою очередь инициирует рост затухания сигналов индукции (в большей мере по k_{MOD} , чем по $k_{Hz/Hr}$). С позиции теории термодинамики открытых неравновесных криогенных систем Земли это означает, что при повышении тепловой энергии в СГТ, в минеральном скелете мерзлых грунтов происходит изменение соотношения количества льда и незамерзшей воды, а также их структуры и свойств, которое приводит к согласованному изменению геолого-геофизических характеристик. В обозначенной схеме цепочки передачи динамики тепловой энергии и заключен главный механизм явления термосвязи затухания не только сигналов индукции, но и иных видов электромагнитных волн.

Из наличия корреляционной связи между переменными следует, что зная значение одной из них нетрудно вычислить по уравнениям регрессии значения любой другой переменной.

Нас интересует возможность вычисления температурного поля не только на глубине 10 м, но и на любой другой глубине в пределах СГТ. Для этого нужно выполнить регрессионные преобразования по трем парным связям: 1) $k_{MOD} \rightarrow t_{sr}$; 2) $\rho_{ef} \rightarrow t_{sr}$; 3) $t_{sr} \rightarrow t_z$.

Первое преобразование выполнялось в зависимости от затухания и электросопротивления мерзлых грунтов по двум степенным уравнениям:

$$t_{sr} = 5,70 + 3,23 \cdot (k_{MOD})^{0,5} \quad (1)$$

$$t_{sr} = 4,39 + 1,70 \cdot (k_{MOD})^{0,5} \quad (2)$$

Уравнение (1) адекватно первой области исходных данных с границами изменения $k_{MOD} - (1,647 \div 2,920) \text{ м}^{-1}$ и электросопротивления 700–800 омметра, а уравнение (2) для второй области с более высокими значениями этих характеристик $-(2,622 \div 3,987) \text{ м}^{-1}$ и 400–500 омметра. Для вычисления температуры по этим уравнениям, не допускающим отрицательных значений аргумента, отрицательные значения k_{MOD} изменены на положительные значения.

Второе преобразование выполнялось по логистическому уравнению регрессии, более корректно, устанавливающему детерминированно-вероятностные количественные отношения исследуемых характеристик:

$$t_{sr} = 28,19 + 3,7798 / (1 + 0,19632 \cdot \exp^{0,0024082 \cdot \rho_{ef}}) \quad (3)$$

В уравнении (3) отрицательные значения температуры пришлось предварительно преобразовать по той же причине, что и значения k_{MOD} в уравнениях (1) и (2), в положительные значения из градусов Цельсия в градусы Фаренгейта.

Третье преобразование осуществимо лишь при условии сильной связи характеристик монотонно изменяющегося по глубине температурного поля.

Таблица 2

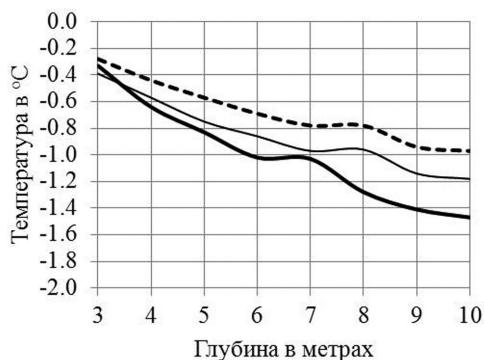
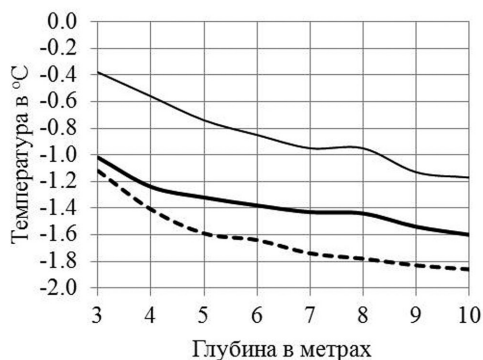
Непараметрическая корреляционная матрица температур мерзлых грунтов на глубине 1–10 м

Переменные	1 м	2 м	3 м	4 м	5 м	6 м	7 м	8 м	9 м	10 м	t_{sr}
1 м	1,00										
2 м	0,82	1,00									
3 м	0,48	0,60	1,00								
4 м	0,40	0,53	0,96	1,00							
5 м	0,34	0,48	0,92	0,98	1,00						
6 м	0,34	0,46	0,90	0,95	0,99	1,00					
7 м	0,28	0,38	0,84	0,88	0,93	0,95	1,00				
8 м	0,32	0,40	0,83	0,90	0,95	0,97	0,91	1,00			
9 м	0,31	0,38	0,78	0,82	0,88	0,91	0,97	0,91	1,00		
10 м	0,34	0,38	0,80	0,83	0,88	0,91	0,96	0,90	0,99	1,00	
t_{sr}	0,34	0,46	0,91	0,97	0,99	0,99	0,94	0,97	0,91	0,90	1,00

Матрица корреляций вполне удовлетворяет этому условию, но не по всей глубине, а только в интервале глубин 3–10 м, т.е. ниже глубины залегания талых грунтов сезонноталого слоя (табл. 2). Для этого интервала глубин найдены соответствующие уравнения полиномиальной регрессии. Они с максимально возможной точностью устанавливают адекватные количественные отношения между значениями t_{sr} , вычисленных по данным метода индукции (характеристикам k_{MOD} , ρ_{el}), и значениями t_z (3–10 м), определен-

ных по данным термометрии скважин.

Ошибка геофизических оценок температуры мерзлого основания трассы ж/д в слое СГТ до глубины 10 м во всех случаях остается систематически заниженной или завышенной на разную величину. На рис. 1 показаны два примера сопоставления результатов электромагнитной и полупроводниковой термометрии. В точке скважины № 4/12 температура по показателям затухания (k_{MOD}) и электросопротивления (R_{el}) завышена максимум на 0,4 °С. В точке скважины № 5/12, располо-



— Термометрия — — — kMOD — — — Ref

— Термометрия — — — kMOD — — — Ref

Рис. 1. Графики сравнительной геолого-геофизической термометрии основания насыпи ж/д в двух точках режимных скважин: слева – в точке скважины № 5/12, справа – в точке скважины № 4/12

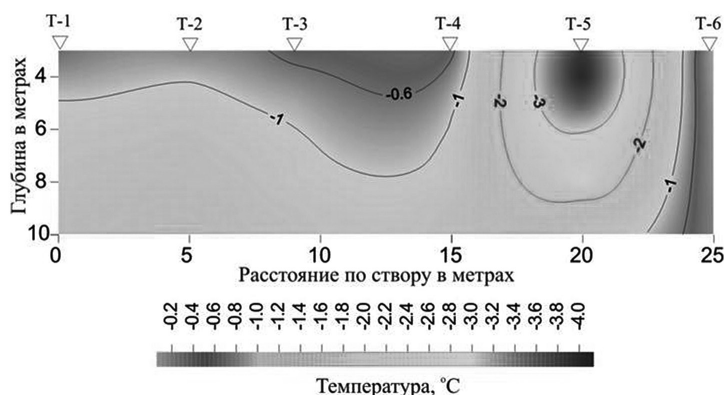


Рис. 2. Геотермический разрез по поперечному профилю на ПК 7179

женной в 10 м от скважины № 4/12, картина распределения ошибок становится неоднозначной и менее удовлетворительной по характеристике электросопротивления. Тем не менее, общее распределение ошибок вполне приемлемо для использования метода индукции в качестве инструмента долговременного мониторинга динамики температурного поля мерзлого основания трассы ж/д до глубины 10 м. Анализ вариограмм показывает, что разброс ошибок по затуханию и электросопротивлению с вероятностью 70% не превышает $\pm 0,2$ и $\pm 0,3$ °C.

Пример термометрических возможностей метода индукции показан на рис. 2. Он ценен тем, что показывает относительную динамику температурного поля по глубине и поперек простирания оси трассы ж/д на том участке трассы ж/д, где нет скважин термометрии.

Из рис. 2 видно, что основание ж/д в разной степени испытывает боковое тепловое влияние. С левой стороны оно наиболее сильно, и поэтому прорывает в слое грунтов до глубины 4 м мерзлотную завесу, создаваемую системой установок воздушного охлаждения в точке зондирования Т-2. Далее, влияние теплового потока распространяется под насыпь ж/д на глубину до 8–10 м, повышая температуру

выше $-2,0$ °C. Наиболее благоприятный для эксплуатации ж/д температурный режим наблюдается с правой стороны, где установлена вторая линия системы установок воздушного охлаждения (окрестности точки зондирования Т-5). Здесь искусственно созданный низкотемпературный режим с температурой до $-4,0$ °C сохраняется до глубины 6–8 м. Ниже, искусственное охлаждение становится неэффективным и температура грунтов уменьшается до $-1,0$ °C и выше. Причина этому – фронтальное по всей глубине тепловое влияние с правой стороны ж/д. Такая интерпретация геотермического разреза достоверна, так как он построен программой «Surfer-8» с использованием алгоритмов фильтрации, выделяющих регулярные фоновые составляющие температурного поля, подавляющих влияние единичных аномальных ошибок и выравнивающих систематические ошибки.

Закключение

Исследование термометрических возможностей метода индукции впервые установило возможность прогнозирования динамики температурного поля по глубине в слое годовых теплооборотов не только по характеристике скорости затухания электромагнитных волн, но и по базовой характеристике

электрических свойств мерзлых грунтов – эффективному электрическому сопротивлению. Производственный аспект результатов исследований состоит в верификации точности вычисления температуры мерзлых грунтов по данным метода индукции в сравнении со стандартным методом термометрии скважин. Достигнутая точность на уровне доверия 70% удовлетворяет требованиям проектно-изыскательских и мониторинговых работ в

строительной, горнодобывающей промышленности, жилищно-коммунальном хозяйстве и экологии. Максимум эффективности применения методики изучения динамики теплового состояния мерзлых грунтов методом индукции ожидается в сетях долговременного температурного геолого-геофизического мониторинга объектов промышленной и гражданской инфраструктуры освоенных и осваиваемых районов криолитозоны России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25358-82. Грунты. Метод полевого определения температуры. – М.: Изд-во Госкомитета СССР по делам строительства, 1982. – 14 с.

2. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных, 4-е изд., перераб.

и доп. – М.: Изд-во ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. – 512 с.

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

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Нерадовский Леонид Георгиевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru, L031950N@yandex.ru.

UDC 550.372+523.31-335.7

THERMOMETRIC CAPABILITIES OF THE INDUCTION METHOD

Neradovskii L.G., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru, L031950N@yandex.ru, Melnikov Permafrost Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 677010, Yakutsk, Russia.

This paper presents a case study on a large linear structure built in the Yakutian permafrost region to demonstrate the capability of the induction method in assessing the permafrost temperature dynamics at various depths within the layer of annual temperature fluctuations. It outlines the methodology for temperature prediction, examines several examples, and analyzes prediction errors in comparison to borehole temperature measurements.

Key words: permafrost, temperature, electrical resistance, attenuation, borehole thermometry, induction method, correlation.

REFERENCES

1. *Grunty. Metod polevogo opredeleniya temperatury. GOST 25358-82* (Soils. Field method of determining temperature. State Standard 25358-82), Moscow, Izd-vo Goskomiteta SSSR po delam stroitel'stva, 1982, 14 p.

2. Kulaichev A.P. *Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh*, 4-e izd. (Methods and tools for integrated data analysis, 4th edition), Moscow, Izd-vo FORUM: INFRA-M, 2006, 512 p.

3. Solov'ev P.A. *Kriolitizona severnoi chasti Leno-Amginskogo mezhdurech'ya* (Permafrost in the northern part of the Lena-Amga watershed), Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1959, 144 p.