

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ В МОНИТОРИНГЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Л.Г. Нерадовский, А.В. Литовко

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

Разработана методика экспериментального исследования влияния температурного поля на затухание напряженности индуктивного электромагнитного поля на частоте 1,125 МГц. Найден адекватные математические модели для практического использования с целью приблизительного вычисления температуры в слое годовых теплооборотов по данным электромагнитного зондирования. Изучена точность работы моделей и дана оценка перспектив применения индуктивной электроразведки в части неразрушающего контроля и прогноза теплового состояния мерзлых оснований инженерных сооружений.

Эксперимент, температура, скважины, индуктивное поле, показатель затухания, математические модели

EXPERIENCE AND PROSPECTS FOR APPLICATION OF FREQUENCY-DOMAIN ELECTROMAGNETIC METHODS IN FROZEN GROUND TEMPERATURE MONITORING

L.G. Neradovsky, A.V. Litovko

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 677010, Yakutsk, Merzlotnaya st., 36, Russia; leoner@mpi.ysn.ru

A methodology of experimental studies of the temperature field influence on attenuation of the induced electromagnetic field strength at the frequency of 1.125 MHz has been developed. Appropriate mathematical models for practical application were found for the purpose of approximate calculation of temperatures in the layer of annual amplitude variations using the data of electromagnetic sounding. The accuracy of the models functioning has been studied, and the prospects for using induction survey in terms of non-destructive examination and prediction of thermal state of frozen foundations of engineering constructions have been evaluated.

Experiment, temperature, boreholes, inductive field, attenuation parameter, mathematical models

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ПУТЬ ЕЕ РЕШЕНИЯ

В современный период времени с невиданным ранее высоким темпом промышленного освоения природных богатств огромных северных территорий России все жестче и острее встает проблема контроля и прогноза температурного состояния криолитозоны, находящейся в сфере механического и теплового взаимодействия с инженерными сооружениями в течение всего срока их эксплуатации. Таких сетей на вечной мерзлоте нет не только в России, но и во всем мире. Главное препятствие заключается в недостатках и ограничениях общепринятой на настоящий момент технологии прошлого века, использующей для дистанционного определения температуры воздуха, воды и почвогрунтов полупроводниковые датчики, погруженные на разную глубину в скважины, обсаженные трубами из металла или пластика. Эта технология обеспечивает необходимую для решения задач науки и практики точность измерения температуры порядка $\pm 0,10 \dots 0,01$ °С. Однако она очень дорогая, трудоемкая и сложна в организации, управлении и вместе с тем непродолжительна в эксплуатации. Более того, бурение скважин на урбанизирован-

ных территориях не везде возможно и разрешено. Наконец, уязвимым местом технологии термометрии скважин с точки зрения экологии является загрязнение окружающей среды с нарушением естественных условий залегания и температурного режима многолетнемерзлых пород.

Как решить обозначенную проблему, сохраняя оптимум между стоимостью, производительностью и информативностью?

Работы, проводимые в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН по разным проектам программ фундаментальных исследований, показали, что один из реальных путей построения оптимальных и долговременных сетей теплового мониторинга разного масштаба и назначения состоит в комплексном подходе. Под ним понимается объединение достоинств и возможностей метода термометрии скважин и методов малоглубинной геофизики. Среди них особая роль принадлежит неклассическим высокочастотным методам электроразведки и, в частности, широко применяемому сейчас методу георадиолокации. Его геокриологическим возможностям посвящен

ряд публикаций автора [Нерадовский, 2008, 2009; Neradovskii, 2011] и монография [Нерадовский, 2011].

В настоящей работе представлены ранее не опубликованные новые результаты, освещающие опыт и перспективу неразрушающего контроля и прогноза теплового состояния мерзлых оснований инженерных сооружений методом среднечастотного индуктивного электромагнитного зондирования.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Исследования продолжают серию натуральных экспериментов с целью доказательства ранее выдвинутой гипотезы о влиянии температурного поля на затухание напряженности индуктивного электромагнитного поля в слое годовых теплооборотов освоенных районов криолитозоны Центральной Якутии. Для достижения поставленной цели необходимо было решить четыре задачи.

1. В точках скважин сети температурного мониторинга выполнить электромагнитные зондирования, гарантированно обеспечивающие изучение естественного основания насыпного железнодорожного полотна до глубины 10–15 м.

2. По результатам зондирований вычислить показатель затухания напряженности вертикальной составляющей вектора магнитной индукции и эффективное электрическое сопротивление в заданной по глубине части основания железной дороги, изученного термометрией скважин.

3. Сопоставить значения характеристик индуктивного поля и температурного поля и при наличии корреляции провести регрессионный анализ с поиском адекватных прямых и обратных математических моделей исследуемых характеристик.

4. Оценить точность вычисления температуры на фиксированной глубине по математическим моделям.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования состоит из трех частей. Первая и вторая части представляют собой участок опытной эксплуатации трассы железной дороги Томмот–Кердём–Нижний Бестях длиной около 400 км и станционную площадку Нижний Бестях размером около 1 км². Эти части объекта изучены в 2011 г. Третья часть объекта относится к полосе местности, прилегающей к трассе на участке Кердём–Нижний Бестях. Она изучена в 2006 г.

Дадим краткую характеристику инженерно-геокриологических условий строительства и эксплуатации объекта исследования.

Южный участок трассы железной дороги начинается от Алданского нагорья и далее проходит

по Центрально-Якутскому плоскогорью с разными ландшафтом, геоморфологией, геологическим строением и криогенным состоянием пород, слагающих верхнюю часть криолитозоны в слое годовых теплооборотов. Она сложена до коренного основания мерзлыми четвертичными отложениями. На поверхности и склонах водоразделов между речками Томмот и Лютенга развит мало-мощный слой делювия–элювия, залегающий на выветренных породах осадочного комплекса кембрийского и нижнеюрского возраста. Кембрий представлен известняками, доломитами и мергелями, а нижняя юра – песчаниками, алевролитами и реже гравийно-галечниковыми отложениями.

Участок Лено-Амгинского междуречья (речки Лютенга, Тарынг) сложен озерно-аллювиальными песчано-глинистыми отложениями. Глинистые разности слагают разрез двух древних террас р. Лена. Это Маганская и Абалахская аккумулятивно-эрозионные террасы. Разрез террас представлен так называемым ледовым комплексом в виде льдистых лёссовидных суглинков с включением древних залежей подземных льдов повторно-жильного генезиса. По данным В.С. Гриненко [1995], они сформировались в каргинский (МИС-3) и сарганский (МИС-2) период позднего плейстоцена. Наибольшая насыщенность разреза льдом установлена бурением и геофизикой на участке железнодорожной трассы ПК7050–ПК7320 [Варламов и др., 2006; Нерадовский, 2008]. Этот участок опасен с точки зрения возможности развития просадочных процессов при оттаивании льдистых грунтов и залежей льдов, сохранившихся после строительных работ в основании насыпного полотна железной дороги. Поэтому особое внимание при организации сети температурного мониторинга было сосредоточено на участке пересечения трассой ледового комплекса, имеющего протяженность 40 км.

Песчаные разности аллювиальных отложений развиты в пределах Тюнгилюнской террасы. Они менее льдистые, но и в них в отдельных местах встречаются клиновидные тела повторно-жильных льдов. При переходе на самую низкую по альтитуде Бестяхскую террасу наблюдается повсеместное распространение песков золово-аллювиального генезиса. Они отличаются однородностью грансостава и невысокой влажностью (порядка 10–15 %). В пределах сезонного слоя пески находятся преимущественно в сыпучем состоянии с влажностью около 5 %.

В разрезе мерзлых песчаных отложений Бестяхской террасы нередко встречаются линзы или слои межмерзлотных таликов. Возможно, из-за теплового влияния таликов температура мерзлых маловлажных песков повышена до $-0,1...-0,8$ °С.

Температурный режим мерзлых грунтов, слагающих основание на остальной части трассы же-

лезной дороги, зависит от множества факторов и, как правило, на глубине 10–15 м колеблется около значений $-1,6...-2,2$ °С.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Сбор первичного фактического материала осуществлен методами термометрии скважин и среднечастотного электромагнитного зондирования (СЭМЗ).

Метод термометрии скважин

Согласно требованиям СНиП, измерение температуры основания железной дороги сделано в скважинах, обсаженных пластиковыми трубами. Применялись полупроводниковые датчики преобразования температуры в виде обычных терморезисторов с разовыми дискретными показаниями или логгеров с непрерывной записью в заданном режиме времени с точностью определения температуры до $0,1$ °С.

Максимальная глубина термометрии скважин равна 10 м. По данным изысканий и научно-исследовательских работ, на этой глубине чаще всего залегает *нижняя граница слоя годовых теплооборотов (СГТ) с неизменной температурой мерзлых грунтов в годовом цикле*. Надо иметь в виду, что положение этой важной границы не остается постоянным и может измениться после проведения строительных работ с нарушением условий теплообмена в результате удаления почвенно-растительного покрова вместе с частью льдистых грунтов и залежами подземных льдов и их замены слоем насыпных крупнообломочных грунтов.

Точное знание глубины залегания нижней границы СГТ не всегда возможно, но всегда желательно при экспериментальном изучении влияния температуры на затухание амплитуды электромагнитного поля (ЭМП). На нижней границе СГТ в разные сезоны года среднегодовая температура остается неизменной в пределах погрешности ее определения $\pm 0,1$ °С. Поэтому метод СЭМЗ можно применять в любой сезон года, привязывая определение показателя затухания амплитуды ЭМП в СГТ к неизменной среднегодовой температуре на нижней границе СГТ. В случаях сравнения значений показателя затухания и среднегодовой температуры, полученных в слое СГТ выше его нижней границы, возникает неразрешимая проблема неучтенных сезонных вариаций температуры, амплитуда которых превышает $\pm 0,1$ °С. Это заведомо ухудшает результаты экспериментальных исследований температурной зависимости затухания амплитуды ЭМП.

Метод СЭМЗ

Зондирование этим методом выполнялось на частоте 1,125 МГц по схеме разнесения приемной антенны с измерителем (микровольтметром) от

неподвижно установленной около скважины излучающей антенны.

Принятая схема дистанционного зондирования производительна и вместе с тем обеспечивает точность полевых измерений на уровне, принятом в геофизике (10–15 %). Такая точность удовлетворительна при проведении разведочных экспериментов. При получении положительных результатов в дальнейшем точность полевых измерений можно повысить до 5 %, применяя более трудоемкие схемы индуктивного зондирования.

Излучающую антенну (ПРД) устанавливали на треноге с угломерным устройством в горизонтальном положении в соответствии со способом индуктивного возбуждения мерзлой грунтовой среды вертикальным магнитным диполем. Приемную антенну (ПРМ) с измерителем оператор переносил в ту или другую сторону вдоль трассы железной дороги без установки на треногу, последовательно удаляясь с заданным шагом 5 м от ПРД на расстояние до 50 м. Высота антенн над поверхностью земли выбрана равной $0,7-0,8$ м.

При максимальном удалении антенны, частоте 1,125 МГц и среднем сопротивлении геоэлектрического разреза всей железнодорожной трассы 700 Ом-м средняя глубина зондирования достигала 18–20 м.

В ходе зондирования при неизменном положении ПРД измеряли две характеристики индуктивного поля: вертикальную (H_z) и горизонтальную (H_r) составляющие вектора магнитной индукции (горизонтальное и вертикальное положения ПРМ). По их отношению для каждого разнесения (АО = 5, 10, ..., 50 м) двухточечной дипольной установки зондирования рассчитывали значения эффективного электрического сопротивления (R_{ef}) и строили графики этой величины. Оценку скорости затухания напряженности индуктивного поля в мерзлом основании трассы железной дороги осуществляли путем аппроксимации степенной функцией амплитудных графиков H_z . Эта функция точнее других трансцендентных функций описывает спад H_z при увеличении разнесения АО. Ее значение при АО = 30 м принималось за показатель затухания индуктивного поля в основании железной дороги до глубины 10–12 м.

Значения R_{ef} относились к точкам замеров H_z и H_r , т. е. к точкам стояния антенны ПРМ. Значения показателя затухания (k) вертикальной составляющей напряженности индуктивного поля H_z относились к точкам стояния антенны ПРД, т. е. к точкам скважин термометрии.

Точную ошибку вычисления оценок истинных значений R_{ef} и k найти невозможно по данным наземного метода геофизики в условиях проведения натурного эксперимента. Поэтому ее пришлось приравнять к ошибке полевых измерений H_z и H_r со средним показателем ($11,5 \pm 6,0$) %.

МАТРИЦА ЭКСПЕРИМЕНТА

В матрицу эксперимента вошли значения характеристик температурного и индуктивного полей, определенные в точках скважин термометрии. Летом 2006 г. они были получены вдоль автотрассы АЯМ (27 скважин), а осенью 2011 г. – по трассе железной дороги Томмот–Кердём–Нижний Бестях (43 скважины) и станции Нижний Бестях (16 скважин). Фактический материал эксперимента составил 86 скважин глубиной 4–10 м. После устранения мелких скважин, непригодных для эксперимента, в выборочной совокупности осталось 70 скважин. Такой объем удовлетворяет требованиям для проведения полноценного статистического анализа.

В матрице четыре переменных. Независимые переменные: t_{sr} – средняя температура в слое годовых теплооборотов до 10 м, t_z – температура на глубине 10 м. Зависимые переменные: средние показатели сопротивления (R_{ef}) и затухания (k) в слое до глубины 10 м.

В отличие от георадиолокации по данным СЭМЗ невозможно дать точную привязку затухания к температуре на фиксированной глубине. Даже при известном сопротивлении разреза глубина зондирования всегда остается приблизительной, отклоняясь случайным образом в ту или другую сторону от среднего значения. Этот недостаток ограничивает возможности метода СЭМЗ в изучении температурной зависимости его характеристик.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Под математическими моделями понимаются линейные или нелинейные, одномерные или многомерные уравнения регрессии, адекватно описывающие выборочную совокупность данных эксперимента с присущим им фактором случайности. Прямые модели описывают вероятностную зависимость средних значений R_{ef} и k от t_{sr} и t_z . В обратных моделях переменные меняются местами с целью расчета средних значений температурных характеристик по данным метода СЭМЗ.

Поиск адекватных моделей осуществлялся по объектам с помощью лицензионной программы Stadia. В ходе поиска учитывалось не только время и место постановки эксперимента, но и особенности литологического состава, температурного режима и электрического сопротивления грунтов, слагающих основание трассы железной дороги, площадки станции или находящихся вне зоны их прямого влияния (местность, прилегающая к автотрассе АЯМ). Адекватными моделями оказались простые трансцендентные функции. Так как они не могут работать с отрицательным значением аргумента, то при построении прямых моделей приходилось менять шкалу Цельсия на шкалу Фа-

ренгейта. По этой же причине при построении обратных моделей требовалось опускать знак показателя затухания, который по своей природе отрицателен.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Собранный материал дает представление о температурной зависимости индуктивного поля в разных условиях опытной эксплуатации трассы железной дороги, строительстве станционных сооружений и прилегающей к ним местности с сохранившимся ландшафтным обликом. Положительные результаты, полученные в этой местности [Нерадовский, Скачков, 2007], инициировали расширение и углубление изучения температурной зависимости.

Работы 2006 г., проведенные по автотрассе АЯМ методом дипольного электромагнитного профилирования с разносом 20 м и частотой 1,125 МГц, впервые обнаружили влияние температурного поля на R_{ef} мерзлых песчано-глинистых грунтов. Позднее температурная зависимость этой величины была изучена в стационарных условиях в разные сезоны года на частотах 549 и 864 кГц методом радиоимпедансного зондирования [Ефремов, 2011]. Эти исследования важны тем, что их можно рассматривать в качестве независимой экспертизы, дающей не только оценку объективности полученных результатов, но и говорящей о том, что выбор направления научных поисков затрагивает общие физические законы.

Попытка непосредственного изучения в 2006 г. температурной зависимости R_{ef} не увенчалась успехом. В результате поиска причин с разными вариантами сортировки материалов и разбиением выборочной совокупности исходных данных на разные подмножества установлено, что существует некоторая граничная температура ($-1,0$ °С), разделяющая всю температурную зависимость на две области определения аргумента. Выше и ниже этой температуры происходит повышение сопротивления мерзлых грунтов в разной степени. Похожая картина наблюдается и по материалам 2011 г. (рис. 1).

Анализ показал, что в области А рост R_{ef} при возрастании температуры на глубине 10 м до $-0,1...-0,3$ °С отмечается в точках скважин, пробуренных на Бестяхской и Тюнгилюнской террасах. Песчано-грядовый рельеф, сосновый лес, слабо развитый почвенный покров, межмерзлотные талики, хорошие фильтрационные свойства грунтов способствуют не только солнечному и гидрогенному прогреву, но и обезвоживанию песчаных террас. При совокупном влиянии этих факторов твердомерзлые пески с течением времени перешли в маловлажное и слабо цементированное поровым льдом состояние с высокими значениями R_{ef} (до первых тысяч ом на метр). Увеличена и

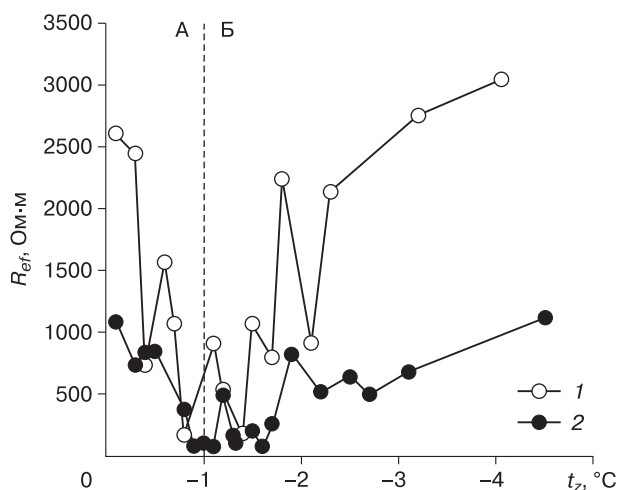


Рис. 1. Зависимость величины эффективного электрического сопротивления мерзлых песчано-глинистых отложений Лено-Амгинского междуречья (R_{ef}) от температуры на глубине 10 м (t_z).

А – пески с высокой отрицательной температурой; Б – суглинки ледового комплекса; 1 – 2006 г.; 2 – 2011 г.

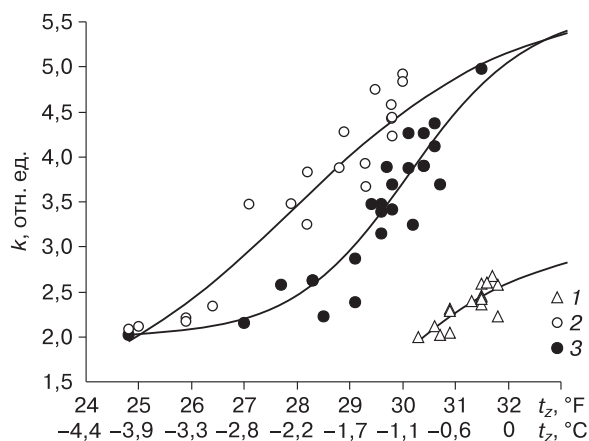


Рис. 2. Точечные диаграммы рассеяния экспериментальных данных и графики аппроксимации экспоненциальными уравнениями температурной зависимости (t_z) показателя затухания индуктивного поля (k) в слое мерзлых грунтов до глубины 10 м.

1 – пески, 2006 г.; 2 – суглинки, 2011 г.; 3 – смешанный песчано-глинистый состав, 2011 г.

мощность СТС, которая даже в начале лета достигает 2,0–2,5 м.

В области Б повышение R_{ef} при понижении температуры до $-2...-4$ °С объясняется расположением скважин на возвышенных речных террасах (Абалахской, Маганской), поверхность которых покрыта густым смешанным лесом с хорошо развитым почвенным покровом и небольшой мощностью СТС на период проведения исследований (0,3–0,5 м). Грунты на этих террасах имеют смешанный песчано-глинистый состав.

След рассеяния точек экспериментальных данных убеждает, что в областях прокладки трассы железной дороги с разным строением и состоянием мерзлой грунтовой среды повышение температуры на глубине 10 м приводит к росту показателя затухания k напряженности индуктивного поля (рис. 2). Основные черты этой закономерности, как и у сигналов георадиолокации, состоят в монотонности в области относительно низких температур и экстремальности в области высоких отрицательных температур вблизи 0 °С, где происходят интенсивные фазовые переходы. Черта асимптотичности, наблюдаемая при переходе мерзлых грунтов в талое состояние, пока только прогнозируется. Все это характерно для кривой температурной зависимости 2011 г., которая, как и другие кривые, описывается логистической функцией. Ее формула будет приведена ниже при обсуждении обратных математических моделей.

При рассмотрении рис. 2 следует обратить внимание на то, что, по данным 2006 и 2011 гг., мерзлая песчаная среда с высокими отрицатель-

ными температурами, незначительной влажностью и высоким сопротивлением имеет фоновый показатель затухания в 1,5–1,7 раза ниже, чем у суглинков и песчано-глинистых отложений. При этом чувствительность показателя затухания к изменению температуры песков практически не меняется. В целом видна частная, а возможно и общая, закономерность: рост фонового затухания напряженности индуктивного поля происходит при смещении соотношения гранулометрического состава отложений в сторону тонкодисперсных фракций.

В любом случае этот факт нельзя упускать из виду при изучении моделей температурной зависимости в Центральной Якутии, в частности на участке эксплуатации трассы железной дороги Томмот–Кердём–Нижний Бестях. Что и было сделано при построении прямых и обратных математических моделей. Рассмотрим их по разновидностям парных корреляций.

Прямая модель зависимости k от R_{ef}

Эта связь важна не для практических целей расчета температуры, а для общего понимания того, каким образом электрическое сопротивление мерзлых дисперсных грунтов в естественных условиях влияет на показатель затухания напряженности индуктивного поля. Заметим, что в теории электродинамики обратная, но не равная R_{ef} величина проводимости входит в мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости и определяет тангенс угла потерь, а значит, и затухания электромагнитных полей в геологических средах.

Обратимся к материалам эксперимента. Из них следует однозначный вывод: рост сопротивления приводит к уменьшению затухания, но причины роста разные (рис. 3). Рост сопротивления в области А, образованной из данных, собранных по глинистым грунтам (суглинкам, супесям и пылеватым пескам), связан с увеличением их льдистости. В области Б, включающей высокотемпературные мерзлые пески Бестяхской террасы р. Лена, рост сопротивления вызван увеличением газовой составляющей в минеральном скелете с незначительным количеством незамерзшей воды и порога льда.

Центры тяжести поля рассеяния экспериментальных данных в областях А и Б дают информацию, необходимую не только для температурного мониторинга, но и для картирования границ распространения по площади района работ песчаных и глинистых отложений. У первых фоновые сопротивление и затухания равны 800 Ом·м и 2,4 отн. ед., у вторых – 300 Ом·м и 4,3 отн. ед., т. е. разница существенная.

Для выделенных областей А и Б найдены адекватные уравнения парной регрессии в виде уравнений натурального логарифма:

$$k = -5,534 + 0,2143 \ln R_{ef},$$

$$R^2 = 0,528 \text{ (область А);} \quad (1)$$

$$k = -4,644 + 0,3156 \ln R_{ef},$$

$$R^2 = 0,427 \text{ (область Б),} \quad (2)$$

где k – показатель затухания H_z в слое до глубины 10 м, отн. ед.; R_{ef} – сопротивление грунтов в 10-мет-

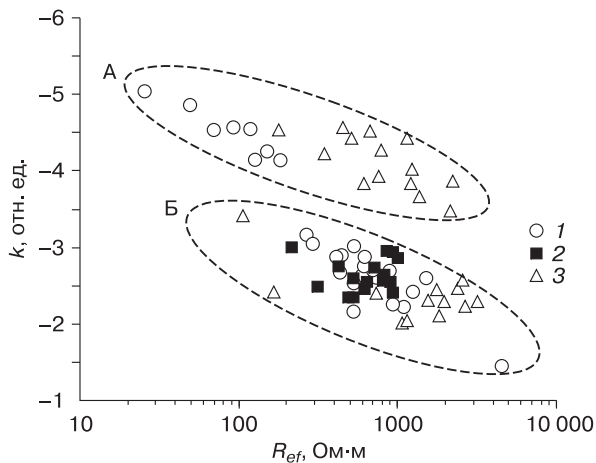


Рис. 3. Корреляционный след разнородных областей зависимости показателя затухания индуктивного поля (k) в слое мерзлых грунтов до глубины 10 м от эффективного электрического сопротивления (R_{ef}) на частоте 1,125 МГц.

А – льдистые суглинки, пески; Б – мерзлые пески с высокой отрицательной температурой; 1 – трасса железной дороги, 2011 г.; 2 – станция Нижний Бестях, 2011 г., 3 – автотрасса АЯМ, 2006 г.

ровом слое, Ом·м, вычисленное по значениям H_z/H_r на частоте 1,125 МГц и разное $AO = 30$ м.

Уравнение (1) учитывает изменение сопротивления в зависимости от степени льдистости низкотемпературных суглинков, слагающих главным образом основание железнодорожной трассы. Уравнение (2) предназначено для учета изменчивости воздушной пористости высокотемпературных мерзлых песков, слагающих в основном площадь Бестяхской террасы, где расположена станция Нижний Бестях.

Уровень детерминации уравнений (1) и (2) невысокий, но значимый в статистическом смысле для приблизительной оценки среднего затухания по известным значениям сопротивления. С доверительной вероятностью 95 % по найденным уравнениям вычисляется k с нулевой средней ошибкой при разбросе значений не более $\pm 0,10$ отн. ед. С такой же вероятностью вариации частных ошибок составляют в относительной метрике 11 и 21 %. Этого достаточно для решения оценочно-прогнозных задач в пределах изученного района работ.

Обратная модель зависимости t_z от k

Напомним, что речь идет не о причинно-следственной связи (температура не может зависеть от затухания), а о формальном порядке изменения мест переменных в модели, что необходимо для решения практических задач. В данном случае обсуждается возможность пообъектного мониторинга с акцентом на расчете среднегодовой температуры мерзлых грунтов на глубине 10 м по затуханию напряженности вертикальной составляющей вектора магнитной индукции H_z .

Для косвенного определения в системе неразрушающего мониторинга среднегодовой температуры по известной динамической характеристике метода СЭМЗ найдены адекватные модели – уравнения логистического типа. Их общий вид:

$$Y = a_0 + a_1 / (1 + a_2 \exp(a_3 x)) + \delta,$$

где Y – температура, °С; a_0, a_1, a_2, a_3 – эмпирические коэффициенты, зависящие от места, времени и условий построения моделей; x – показатель затухания H_z , отн. ед.; δ – случайная ошибка.

Приведем рабочие расчетные уравнения, полученные после чистки так называемых “выбросов” и правки значений переменных в пределах ошибки полевых измерений (температуры $\pm 0,10$ °С, затухания $\pm 10...20$ %):

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

$$R^2 = 0,849; \quad (3)$$

$$t_z = -0,4837 - 119,1 / (1 + 10,52 \exp(0,5664k)),$$

$$R^2 = 0,865; \quad (4)$$

$$t_z = -12,43 + 12,44 / (1 + 15,62 \exp(-2,756k)),$$

$$R^2 = 0,654. \quad (5)$$

Условия применимости уравнений. Уравнение (3) используется для осеннего периода года (сентябрь–октябрь) по трассе железной дороги Томмот–Кердём–Нижний Бестях, естественное основание которой сложено разными грунтами с различными свойствами и температурным режимом). Принимая во внимание большую протяженность линейного сооружения и его огромную значимость для развития народного хозяйства Якутии, это уравнение представляет собой математическую модель мониторинга регионального уровня. Разумеется, на последующих этапах научных исследований модель должна проверяться на точность и устойчивость работы в процессе пополнения новым фактическим материалом и в любом случае корректироваться и совершенствоваться.

Пока же точность работы модели проверена на материале эксперимента по 24 скважинам. Она хорошо сбалансирована и с равной вероятностью завышает/занижает по отношению к данным термометрии скважин значения температур со средней ошибкой $(0,00 \pm 0,15)^\circ\text{C}$.

Разброс частных значений ошибок намного больше. С вероятностью 95 % его границы равны $\pm 0,84^\circ\text{C}$. И это естественно для объекта мониторинга с большим разнообразием инженерно-геокриологических условий. Об этом же говорит широкий интервал определения переменных модели: по затуханию 2,02–5,15 отн. ед., по температуре $+0,00...-4,50^\circ\text{C}$.

Уравнение (4) используется для летнего сезона года (июнь) в полосе местности Лено-Амгинского междуречья, прилегающей к трассе железной дороги на участке развития ледового комплекса, тепловое состояние которого осталось не затронутым строительными работами. Этот участок сложен мерзлыми глинистыми грунтами с температурой ниже $-1,0^\circ\text{C}$. Эта модель более мелкого порядка, но важна тем, что с ее помощью возможен сравнительный контроль теплового состояния мерзлой дисперсной среды в нарушенных и не нарушенных строительством условиях на потенциально опасном участке эксплуатации трассы железной дороги.

Точность работы модели проверена по 16 скважинам. Средняя ошибка $(0,10 \pm 0,15)^\circ\text{C}$. Частные значения ошибок с вероятностью 95 % заключены в интервале $\pm 0,65^\circ\text{C}$. Область определения переменных модели: по затуханию 1,18–3,81 отн. ед., по температуре $-1,10...-3,90^\circ\text{C}$.

Уравнение (5) используется для осеннего и летнего периода года на станции Нижний Бестях, трассе железной дороги и АЯМ. Эта сводная модель описывает неустойчивое тепловое состояние мерзлых оснований линейных и площадных инженерных сооружений, сложенных высокотемпературными песчаными отложениями преимущест-

венно Бестяхской террасы с температурой выше $-1,0^\circ\text{C}$. В сравнении с рассмотренными моделями модель имеет еще более узкую область изменчивости переменных: по затуханию 2,00–2,68 отн. ед., по температуре $-0,10...-0,38^\circ\text{C}$. Точность модели проверена на 30 скважинах. Средняя ошибка расчета температуры мерзлых песков на глубине 10 м равна $(0,03 \pm 0,04)^\circ\text{C}$. Разброс значений частных ошибок с вероятностью 95 % равен $\pm 0,26^\circ\text{C}$.

Достигнутая точность модели, освобожденной от влияния литологического фактора, могла бы быть выше, но этому препятствует узкая область изменения значений переменных модели и присутствие в модели выборки значений переменных по станции Нижний Бестях. Высокие отрицательные температуры ($-0,1...-0,3^\circ\text{C}$) и низкая весовая влажность мерзлых песков (10–15 %) приводят к неконтролируемому изменению в минеральном скелете соотношения объема порового пространства, занятого цементирующим льдом и воздухом. Малейшие изменения этого соотношения в ту или другую сторону вызывают при одинаковой температуре изменения затухания ЭМП. Таким образом, и в благоприятных условиях проведения полевого эксперимента температурный фактор не в состоянии проявить себя в чистом виде без влияния других мерзлотно-грунтовых факторов. Его вклад в контролируемое изменение затухания ЭМП остается невысоким и оценивается по коэффициенту множественной детерминации на уровне 60–70 %.

Пообъектная структура доли распределения частных ошибок (табл. 1) показывает, что модели (3)–(5) вполне пригодны для контроля и прогноза теплового состояния мерзлого основания железнодорожной трассы и площадки станции Нижний Бестях. Следует заметить, что этот вывод о перспективах применения индуктивной электроразведки правомерен при условии, что в основании железной дороги ниже подошвы слоя годовых теплооборотов не появятся тепловые источники в

Таблица 1. Вероятностная структура частных ошибок моделей

Категория точности вычисления температуры на глубине 10 м	Интервал ошибки, $^\circ\text{C}$	Вероятность (число случаев), %		
		Трасса ж.д. (N = 24)	Трасса АЯМ (N = 16)	Станция (N = 30)
Высокая	$\pm 0,0...0,2$	50	75	87
Средняя	$\pm 0,2...0,4$	29	19	13
Пониженная	$\pm 0,4...0,6$	8	0	0
Низкая	$\pm 0,6...1,0$	13	6	0
Очень низкая	более $\pm 1,0$	0	0	0
Контрольная сумма	$\pm 0,0...1,0$ и более	100	100	100

Примечание. N – число скважин термометрии.

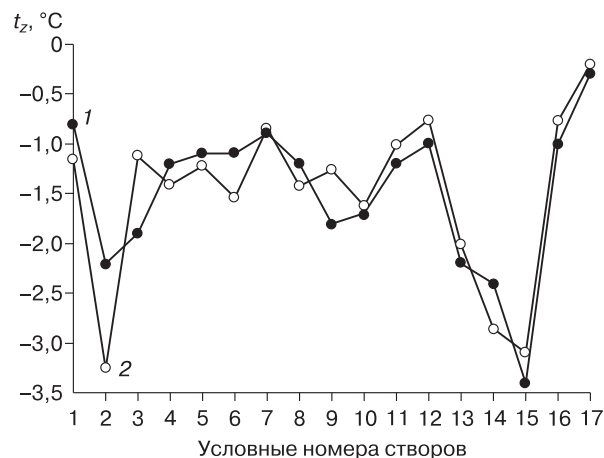


Рис. 4. Линейная изменчивость температурного режима мерзлого основания трассы железной дороги на глубине 10 м в 2011 г.

1 – данные термометрии скважин; 2 – математическое моделирование по данным индуктивной электроразведки.

виде подземных вод, а сам слой не будет загрязнен солями сельскохозяйственных удобрений и нефтепродуктами.

В большинстве случаев по логистическим моделям средняя температура мерзлых грунтов на глубине 10 м вычисляется с ошибкой $\pm 0,4$ °С. Причем доля измерений, близких к точности термометрии скважин, не опускается ниже 50 %. Доля больших ошибок (выше 0,6 °С) составляет 10–13 %.

Проиллюстрируем перспективы индуктивной электроразведки в неразрушающем контроле температурного режима инженерных сооружений на примере основания трассы железной дороги на глубине 10 м между мониторинговыми створами. Их номера условны и привязаны к пикетам трассы в направлении Томмот (ПК3830)–Нижний Бестях (ПК7850). На рис. 4 и в табл. 2 мы видим, несмотря на ошибки, картину согласованной линейной изменчивости локализованного и регионального температурного режима по термометрии скважин

Таблица 2.

Ошибки вычисления по математической модели температуры на глубине 10 м по трассе железной дороги Томмот–Кердём–Нижний Бестях

Усл. номер створа	Номер пикета трассы	Номер точки (скв.)	Номер точки по СЭМЗ	Температура (°С) на глубине 10 м		Ошибка модели	
				Термометрия	Модель	δ , °С	$\Delta\zeta$, %
1	3830	X-1	5	-0,8	-1,16	0,36	-36,7
2	3836	X-2	7	-2,2	-3,26	1,06	-38,8
3	6963	X-3	14	-1,9	-1,13	-0,77	50,8
4	7005+50	18	18	-1,2	-1,41	0,21	-16,1
5	7010	16	17	-1,2	-1,86	0,66	-43,1
5	7010	17	16	-1,0	-1,00	0,00	0,0
6	7010+50	СВ	19	-1,1	-1,54	0,44	-33,3
7	7011	X-4	20	-0,9	-0,84	-0,06	6,9
8	7078+50	19	21	-1,2	-1,42	0,22	-16,8
9	7083	21	23	-1,7	-1,45	-0,25	15,9
9	7083	22	22	-1,9	-1,07	-0,83	55,9
10	7088	23	25	-1,5	-1,71	0,21	-13,1
10	7088	28	24	-1,8	-1,52	-0,28	16,9
11	7171	24	30	-1,2	-4,70	3,50	-118,6
11	7171	25	29	-1,2	-1,01	-0,19	17,2
12	7270	15	34	-1,0	-0,76	-0,24	27,3
13	7489	10	41	-1,4	-1,16	-0,24	18,8
13	7489	11	40	-2,7	-2,24	-0,46	18,6
13	7489	12	39	-3,0	-2,56	-0,44	15,8
13	7489	13	37	-1,8	-2,08	0,28	-14,4
14	7513	8	35	-3,0	-3,40	0,40	-12,5
14	7513	9	36	-1,8	-2,32	0,52	-25,2
15	7563	6	43	-2,3	-2,46	0,16	-6,7
15	7563	7	42	-4,5	-3,73	-0,77	18,7
16	7563+65	5	44	-1,0	-0,77	-0,23	26,0
17	7850	1	49	-0,3	-0,23	-0,07	26,4
17	7850	2	46	-0,3	-0,19	-0,11	44,9
17	7850	3	45	-0,2	-0,14	-0,06	35,3
17	7850	4	47	-0,3	-0,22	-0,08	30,8

Примечание. δ – абсолютная ошибка; $\Delta\zeta$ – относительная ошибка (по отношению к данным термометрии).

и геофизике. Степень близости температурных рядов 86 %. Остается проследить, как будет меняться эта картина от года к году в течение всего срока эксплуатации железной дороги.

Обратная модель зависимости t_{sr} от k

По показателю затухания (k) рекомендуется дополнительно оценивать среднюю температуру (t_{sr}) в СГТ до глубины 10 м. Модель для решения этой задачи будет более устойчива при использовании медианных значений температур, нечувствительных к присутствию в данных случайных или неслучайных экстремальных значений. При этом можно рассчитывать на получение неискаженной информации о тепловом состоянии основания трассы железной дороги по отношению к его центру (глубине 5–6 м).

В явном виде эта задача решается на Лено-Амгинском междуречье с ненарушенным ландшафтом в местности, примыкающей к автотрассе АЯМ. Здесь доля влияния температуры на изменчивость затухания составляет 70–75 %. На других объектах влияние температурного фактора скрыто более сильным действием других мерзлотно-грунтовых факторов. Это – состав, пористость, льдистость и криогенная текстура. Первый фактор проявляется в мерзлых песках с невысокой влажностью и высокой отрицательной температурой, а также в морозных крупнообломочных грунтах железнодорожной насыпи. Вторым и третьим факторами действуют в мерзлых песках, суглинках и супесях ледового комплекса. В результате влияния этих

факторов связь затухания индуктивного поля со средней температурой не только нивелируется, но и становится неоднозначной. В результате при одной и той же температуре в разных местах трассы железной дороги мы наблюдаем разное затухание. В одних случаях оно выше, в других – ниже. Создается картина случайной изменчивости затухания, по которой можно принять ошибочное решение, что температура не влияет на затухание. Однако если провести детальный анализ с разбиением выборки по составу грунтов, то искомая связь обнаруживается и предстает в закономерном линейном виде в границах двух областей (рис. 5). Для них найдены уравнения регрессии для вычисления средней температуры мерзлых грунтов в основании трассы железной дороги до глубины 10 м.

Таким образом, для вычисления средней температуры в СГТ “рафинированные” модели (очищенные, насколько это объективно возможно, от влияния мерзлотно-грунтовых факторов) надо всегда строить с учетом генезиса и состава мерзлой грунтовой среды. Не приводя уравнений моделей, ограничимся ссылкой на их точность применительно ко всей выборке исходных данных. Как и следовало ожидать, точность моделей невысокая. Неумолимо работает правило: за пределами построения моделей их точность ухудшается. С вероятностью 95 % разброс частных ошибок следующий: станция Нижний Бестях $\pm 0,1$ °С, глинистые и песчаные разности ледового комплекса $\pm 1,0...1,1$ °С, трасса АЯМ $\pm 0,7$ °С. Ошибки велики,

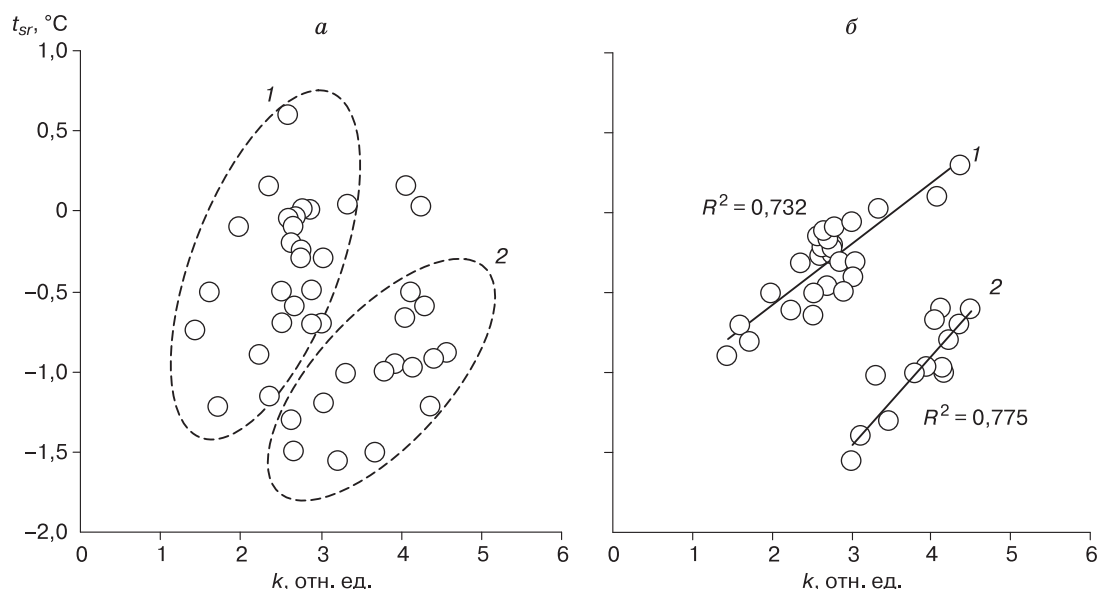


Рис. 5. Скрытая и очищенная от влияния мерзлотно-грунтовых факторов формальная корреляция переменных обратной математической модели для расчета средней температуры основания трассы железной дороги по данным индуктивной электроразведки:

а – исходный экспериментальный материал; *б* – отсортированный агрегированный материал с линиями регрессии; 1 – песчаные разности; 2 – глинистые разности.

но даже с такими ошибками модель способна отследить во времени переход отдельных участков или всего мерзлого основания трассы железной дороги за критическую черту выше $-1,0$ °С. Средние же ошибки в несколько раз меньше и не превышают уровень $\pm 0,3$ °С.

Напрашивается вывод: в ходе геофизического мониторинга надо оперировать средними оценками вычисляемых температур, отслеживая линейно-площадные и временные трендовые корреляционные сдвиги уровня температурного поля в ту или иную сторону в окрестности створов скважин термометрии или всего линейного сооружения. Такой системный подход органично впитывает в себя принципы функционирования природно-техногенных систем разных уровней и назначения [Шестернев, 2011].

Подведем итог обсуждения результатов исследований.

1. Метод СЭМЗ, как и георадиолокация, непригоден для разовых и разрозненных определений температуры мерзлых грунтовых сред в целях диагностики. Однако он эффективен в неразрушающем контроле и прогнозе температурного состояния оснований линейных и площадных инженерных сооружений при использовании средних расчетных показателей трендовых изменений уровня и направленности температурного поля в сетях долговременного мониторинга с привязкой к данным термометрии скважин.

2. В качестве *термозависимых свойств* у метода СЭМЗ выступают эффективное электрическое сопротивление и затухание напряженности вертикальной составляющей вектора магнитной индукции (H_z). Помимо этого в качестве мониторинговой характеристики следует принять морфологическое свойство – форму кривых СЭМЗ, которая является чутким индикатором изменения строения и состояния мерзлой грунтовой среды.

3. Полнота и достоверность результатов мониторинга методом СЭМЗ повысится при его дополнении методом георадиолокации и другими методами геофизики, например радиоимпедансным зондированием.

4. Логистические модели из класса экспоненциальных функций являются оптимальными по точности и разнообразию условий применения. Эти модели адекватно описывают температурную зависимость характеристик индуктивного электромагнитного поля как в прямом, так и в обратном порядке.

5. Изучение температурной зависимости затухания амплитуды индуктивного электромагнитного поля и построение математических моделей для вычисления температуры по данным метода СЭМЗ требует взвешенного подхода, строго учитывающего строение, состояние и свойства грун-

товой среды, а также условия эксплуатации объектов мониторинга. Чем крупнее масштаб объекта мониторинга, тем точнее работает регрессионная модель, привязанная к его индивидуальным особенностям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние температуры мерзлых грунтов на затухание напряженности индуктивного электромагнитного поля в слое годовых теплооборотов экспериментально установлено. Единый эмпирический облик этого явления наряду с сигналами георадиолокации позволяет рассматривать его как частный случай одного из общих физических законов. Изучение явления имеет научно-прикладное значение или, как сейчас принято говорить, содержит инновационный потенциал.

Метод индуктивной электроразведки принципиально не отличается от метода термометрии скважин. Оба метода используют один и тот же подход в косвенной оценке неизвестной истинной температуры, но математические модели у них разные. Метод термометрии скважин базируется на точных однофакторных функциональных моделях температурной зависимости сопротивления электротехнических материалов, а метод индуктивной электроразведки, как и георадиолокация, опирается на многофакторные вероятностные модели. Они сложнее по природе исследуемого явления в условиях *in situ*, чем теоретико-эмпирические модели температурной зависимости, полученные в лаборатории. Поэтому даже в далекой перспективе нельзя противопоставлять геофизику термометрии скважин. Плодотворнее объединить их ценные качества, а именно, высокую точность термометрии скважин с низкой стоимостью, хорошей производительностью и объемной информативностью методов геофизики.

Цель одна – построение гибких сетей объектного, локального или регионального неразрушающего контроля и прогноза теплового состояния мерзлых оснований инженерных сооружений в течение всего срока их эксплуатации. При этом точности апробированных методов геофизики достаточно, чтобы по измерениям привязанных к точкам скважин и между ними вычислять достоверные оценки средних показателей температурного поля на нижней границе и в слое годовых теплооборотов. Построенные на этом материале карты изотерм дадут важную информацию о краткосрочных и долгосрочных тенденциях пространственно-временных изменений теплового состояния криолитозоны освоенных и осваиваемых районов северных территорий России под воздействием современного климата Земли и техногенеза. Такой подход и предлагаемые нами технологии для его практической реализации сегодня насущно необ-

ходимы. Остается надеяться, что в свое время они будут востребованы научно-инженерным сообществом.

Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук Д.М. Шестернёва в лаборатории инженерной геоэкологии ИМЗ СО РАН в рамках Госконтракта № 1090 с правительством Республики Саха (Якутия).

Литература

- Варламов С.П., Скрыбин П.Н., Скачков Ю.Б., Шендер Н.И.** Геоэкологические условия проектируемой железной дороги Томмот–Кердём на территории развития ледового комплекса // Наука и образование, 2006, № 4, с. 78–83.
- Гриненко В.С.** Геологическое строение Большого Якутска // Региональная геология Якутии. Якутск, Изд-во Якут. ун-та, 1995, с. 3–20.
- Ефремов В.Н.** Температурная зависимость сезонных изменений электрического сопротивления многолетнемерзлого грунта // Материалы IV конф. геоэкологов России (М., 7–9 июня 2011 г.). М., Унив. книга, 2011, 376 с.
- Нерадовский Л.Г.** Изучение ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья // Геоэкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2008, № 5, с. 460–467.
- Нерадовский Л.Г.** Влияние температуры многолетнемерзлых грунтов на затухание электромагнитной энергии // Геофизика, 2009, № 2, с. 57–67.
- Нерадовский Л.Г.** Температурная зависимость сигналов георадиолокации в освоенных районах криолитозоны Якутии. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2011, 166 с.
- Нерадовский Л.Г., Скачков Ю.Б.** Возможности использования электромагнитного поля для температурного мониторинга многолетнемерзлых пород Центральной Якутии // Материалы Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных регионов”. Салехард, 2007, т. 2, с. 173–176.
- Шестернев Д.М.** Основные принципы организации геоэкологического мониторинга на примере линейных сооружений железной дороги Беркакит–Томмот–Якутск // Материалы IX Междунар. симпозиума (Мирный, 3–7 сент. 2011 г.). Якутск, ИМЗ СО РАН, 2011.
- Neradovskii L.G.** Calculation of the temperature of frozen ground on the basis of mathematical models of the temperature dependence of ground penetrating radar signals // Measurement Techniques, 2011, vol. 54, iss. 8, p. 931–938. DOI 2011, 10.1007/s11018-0011-9829-2.

*Поступила в редакцию
5 апреля 2012 г.*