НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 4, с. 56–65 http://www.izdatgeo.ru

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВО ЛЬДУ И МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

УДК 622.011.4:621.396.96

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ЗАТУХАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОСВОЕННЫХ РАЙОНАХ КРИОЛИТОЗОНЫ ЯКУТИИ

Л.Г. Нерадовский

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

Обобщены результаты экспериментов 2007–2009 гг., проведенных в центрах освоенных районов криолитозоны Якутии с целью доказательства гипотез о влиянии температурного поля на затухание электромагнитного поля георадиолокатора в вечной мерзлоте. Показано, что это явление существует и имеет региональные особенности в слое годовых теплооборотов в различных условиях застроенных территорий. Описана методика изучения температурной зависимости электромагнитного поля и построения ее математических моделей для вычисления температуры грунтов по данным георадиолокации. Исследованы погрешности математических моделей. Определено направление дальнейших исследований и даны рекомендации по практическому использованию моделей.

Температура, скважины, георадиолокация, показатель затухания, математические модели

EFFECT OF GROUND TEMPERATURES ON ELECTROMAGNETIC FIELD ATTENUATION IN DEVELOPED AREAS OF THE YAKUTIAN PERMAFROST REGION

L.G. Neradovsky

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

The results of experiments performed in 2007–2009 in the centers of the developed permafrost regions of Yakutia in order to prove the hypotheses about the temperature field effect on the electromagnetic field attenuation in permafrost have been summarized. It has been demonstrated that this phenomenon exists and has region-specific patterns within the layer of annual temperature variation in the built-up areas with different conditions. The procedure of investigation of the temperature dependence and the mathematical modeling for estimating ground temperatures from the ground penetrating radar data has been described. The simulation error has been examined. Lines for further research have been identified, and recommendations on the practical use of models have been formulated.

Temperature, boreholes, ground penetrating radar, attenuation parameter, mathematical models

ВВЕДЕНИЕ

Температура многолетнемерзлых пород (ММП) относится к категории фундаментальных физических свойств, которые изучает геокриология. От температуры пород грунтовых оснований инженерных сооружений во многом зависит их механическая прочность, а значит, и надежность, устойчивость работы строительных конструкций и фундаментов, эксплуатируемых в криолитозоне по I принципу. По мере промышленного развития северных территорий Сибири и Дальнего Востока и освоения их природных богатств все актуальнее становится проблема создания долговременных мониторинговых сетей, охватывающих всю площадь инфраструктуры городского хозяйства и промышленных зон. Речь идет о необходимости дистанционного контроля температурного состояния мерзлых грунтовых оснований зданий и сооружений в течение всего срока их эксплуатации, т. е. около 50 лет.

Таких сетей в России пока не существует. Причин этому много, и одна из них – дороговизна бурения и обустройства скважин для определения в них температуры грунтов. Бурение скважин на застроенных территориях не везде возможно и разрешено. Большие проблемы возникают при сохранении скважин термометрии в рабочем состоянии. Они часто выводятся из строя автотранспортом и тяжелой техникой, забиваются мусором или закупориваются ледяными пробками при поступлении воды в обсадную трубу. Срок эксплуатации избежавших быстрого уничтожения скважин термометрии измеряется в лучшем случае одним десятком лет. Все это создает трудности в организации и проведении систематического контроля температурного состояния мерзлых грунтовых оснований на всей площади застроенных территорий.

Решение проблемы автор видит в комплексном подходе, т. е. в использовании наряду с методом термометрии скважин методов высокочастотной электроразведки, особенно георадиолокации.

Предлагается применять георадиолокацию в качестве радиометода для определения некоторых важных для строительного проектирования на мерзлоте характеристик температурного поля. Физической основой для этого служит затухание амплитуды электромагнитных импульсов в слое годовых теплооборотов. Это явление было обнаружено автором [*Нерадовский, 2005*] и исследовано в ходе экспериментов в освоенных районах криолитозоны Якутии в 2007–2010 гг. Результаты этих исследований приведены в настоящей работе.

ЦЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Цель экспериментов – исследовать особенности влияния температурного поля на затухание электромагнитного поля в ММП.

Для ее достижения необходимо было решить три задачи.

1. Провести измерения температуры грунтов в скважинах до глубин 10–15 м. В окрестностях скважины сделать записи сигналов георадиолокатора там, где есть возможность установить неподвижно или перемещать приемно-передающие антенны.

2. По записям сигналов определить усредненный показатель затухания амплитуды электромагнитных импульсов в заданной части слоя годовых теплооборотов.

3. Сопоставить значения показателя затухания со значениями температуры и провести статистический анализ парных корреляционно-регрессионных связей исследуемых величин.

ОБЪЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Выбор места и времени постановки экспериментов был обусловлен появлением и благоприятным сочетанием целого ряда обстоятельств. Не вдаваясь в детали, отметим, что все они, так или иначе, возникли из-за необходимости научного сопровождения хоздоговорных работ на территории трех крупных городов – Мирного, Якутска, Нерюнгри – центров освоенных районов криолитозоны Якутии.

Фактор неожиданности или случайности, проявляющий себя на стадии организации экспериментов, имеет важное значение. Он лишает исследователя свободы выбора и ставит его перед необходимостью ограничиваться той исходной информацией, которая ему предоставлена. Тем самым повышается чистота исследований в отношении независимости сбора фактического материала на изучаемой территории и последующей его камеральной и математической обработки средствами статистического анализа.

Ниже приводится характеристика инженерно-геокриологических условий экспериментов, выполненных в разных местах Сибирской платформы в городах Мирный, Якутск и Нерюнгри.

1. *Город Мирный* расположен в западной части Якутии на южной границе Прианабарского региона Мирнинского кимберлитового поля, где развита тектоника с магматизмом в виде ультраосновных пород трапповой формации [*Инженерная геология СССР, 1977*]. Эта территория входит в область сплошного распространения ММП мощностью 700–1200 м. В районе Мирного она уменьшается до 400–500 м [*Ефимов, 1964*].

Городская территория занимает поверхность водораздела и ее пологий склон южной экспозиции левого берега долины р. Ирелях. По геологическим данным грунтовое основание города сложено комплексом осадочных пород нижнего ордовика.

По материалам изыскательских работ они образуют в разрезе до глубины 10–20 м переслаивающуюся толщу мергелей, известняков, доломитов и песчаников. Эти породы дезинтегрированы избирательным и глубоким физико-химическим выветриванием. Мощность выветренной зоны соизмерима с мощностью годовых теплооборотов и составляет 8–10 м. Прочностное состояние пород в этой зоне находится в прямой зависимости от их литологии, температуры и степени цементации текстурным льдом. При оттаивании породы способны давать неравномерные осадки, а мергель вообще теряет всякую прочность, переходя в жидкую консистенцию. Сверху толща осадочных пород перекрыта до 3–5 м слоем насыпных крупнообломочных грунтов и естественным плащом элювия–делювия в виде суглинков и супесей с различным содержанием крупнообломочного материала. Степень льдистости толщи пород редко превышает 15–30 %.

Несмотря на обилие фактического материала, накопленного за десятки лет проведения различных исследований, обобщающих работ по изучению закономерностей температурного поля в г. Мирный в настоящее время нет. Судя по ранним публикациям [*Смирнов, 1967*], основными чертами естественного температурного режима ММП являются неглубокое залегание нижней границы слоя годовых колебаний температур (8–10 м) и высокие горизонтальные градиенты (до 1 °С на 100 м). Частное обобщение, сделанное автором по термометрии 2007 г., показывает, что в тех местах

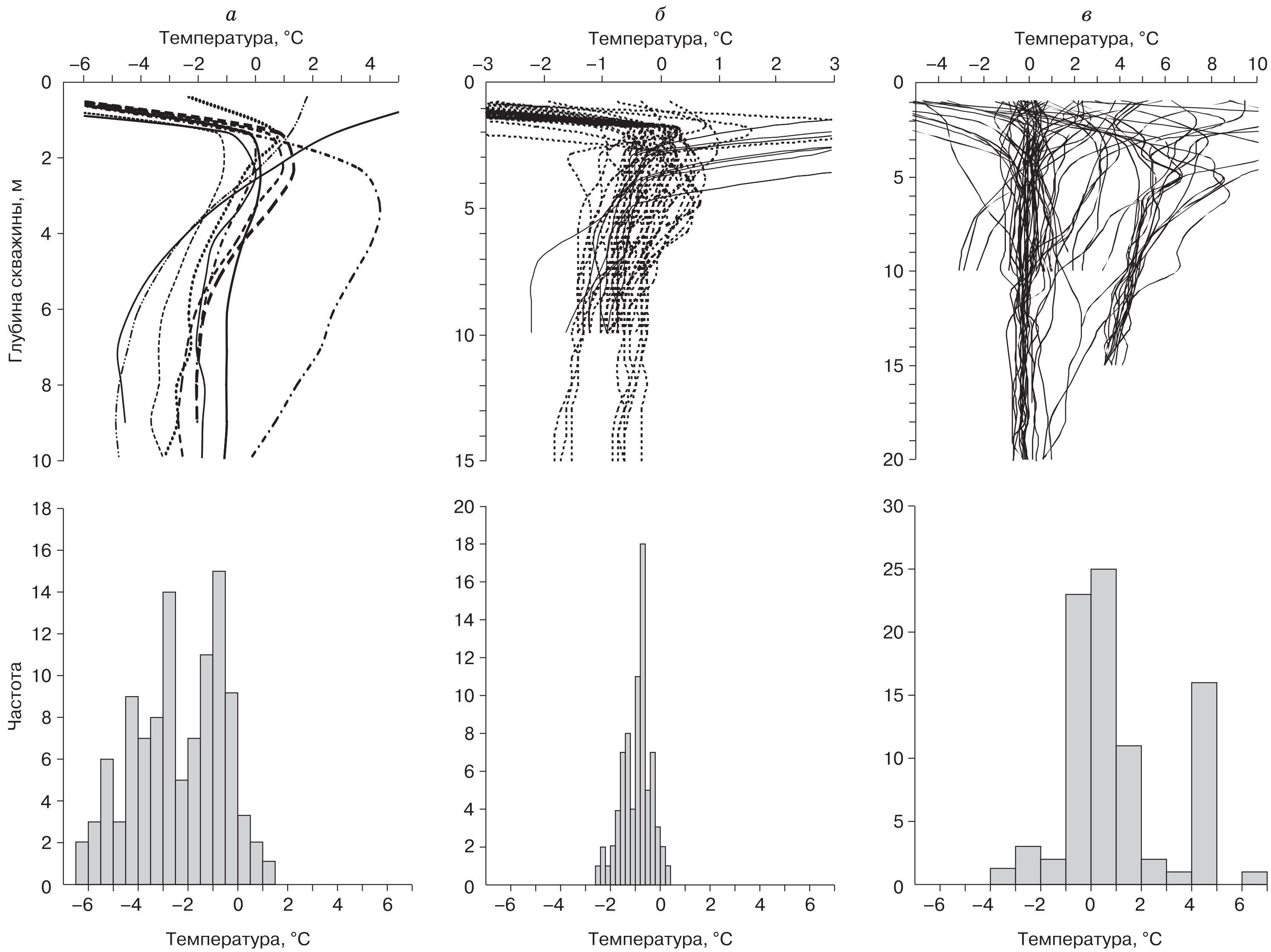


Рис. 1. Температурное поле грунтов в слое годовых теплооборотов под зданиями и сооружениями в различных городах Якутии:
а – Мирный, ноябрь 2007 г., *б* – Якутск, апрель 2008 г., *в* – Нерюнгри, весна–осень 1986–1991 гг.; *вверху* – сводные графики термометрии скважин; *внизу* – гистограммы температур грунтов на глубине 10 м.

города, где проводился эксперимент, температурное поле ММП сохранило свой естественный облик, присущий ему до начала массового гражданского строительства (рис. 1, *а*). На время проведения эксперимента среднегодовая температура грунтов изменялась на глубине 10 м в диапазоне от +2,2 до −6,2 °C при среднем значении −(3,1 ± 0,4) °C. При этом преобладали низкие температуры мерзлых грунтов (−1...−4 °C). Они отмечались в 73 % случаев, а высокие (выше −1 °C) лишь в 16 % случаев. Переход мерзлых грунтовых оснований зданий в талое состояние в зоне работы свайных фундаментов не такое уж редкое событие на территории Мирного [*Снегирев, Бойков, 2002*]. По грубым оценкам, вероятность его реализации под воздействием техногенных причин составляет порядка 10 %.

Эксперимент в г. Мирный проводился в ноябре 2007 г. В число его объектов вошли административные и общественные здания (школы, детсады), включенные в список мерзлотного мониторинга в годовом цикле. Здания выстроены цепочкой с севера на юг по направлению к пойме р. Ирелях. По контуру зданий до глубины 10–15 м установлены скважины термометрии. Это наиболее распространенная для условий Якутии глубина, где амплитуда колебаний среднегодовой температуры мерзлых грунтов минимальна и не превышает погрешности датчиков температуры.

Графики температурной зависимости, т. е. градуировочные кривые, получают по специальной методике [*Руководство..., 1985*]. Градуировка датчиков температуры достаточно высокая: погрешность составляет сотые доли градуса, хотя реальная погрешность определения температуры грунтов терморезисторами находится на уровне ±0,1 °C.

Становится понятным, почему ставшее общеупотребительным в среде геокриологов и изыскателей словосочетание “измерение температуры” некорректно применять к методу термометрии скважин терморезисторными датчиками. Что касается эксперимента по городу Мирный, то в нем задействовано 97 точек скважин, в которых были определены значения показателя затухания амплитуды электромагнитных импульсов[1]. О методике его определения будет сказано ниже.

Условия проведения эксперимента, полученные результаты и физическая интерпретация основного параметра *k* (показателя затухания электромагнитного поля) подробно описаны в журнале Евро-Азиатского геофизического общества (EAGE) “Геофизика” [*Нерадовский, 2009а*].

2. *Город Якутск* расположен в восточной части Сибирской платформы на аккумулятивной Центрально-Якутской низменности в пределах Вилюйской синеклизы, занимая левый берег долины р. Лены, называемой “Туймаадой”. Основание долины сложено мерзлыми осадочными породами молассовидной формации нижней и средней юры (алевролиты, алевриты, аргиллиты, песчаники, известняки) мезозойского структурного этажа [*Инженерная геология СССР, 1977*]. Сверху коренное основание перекрыто толщей мерзлых четвертичных песчано-глинистых аллювиальных отложений. Мощность толщи до 30 м. На ней и построен город.

Согласно современным уточненным данным по геоморфологии и стратиграфии района Якутска, долина р. Лены представлена не пятью террасами (по классификации П.А. Соловьёва), а одной надпойменной террасой, сложенной дриас-голоценовыми аллювиальными отложениями и вложенными в нее двумя голоценовыми структурами – высокой и низкой поймой [*Спектор и др., 2008*].

Поверхность надпойменной террасы, высокой и низкой поймы изрезана многочисленными речными протоками и старичными озерами, под которыми до глубины 5–15 м образовались талики. Немалая часть водоемов засыпана в ходе строительства. Вместе с ними захоронены и талики. Об их существовании быстро забывают, и это в значительной мере затрудняет правильное понимание пестрой картины инженерно-геокриологических условий эксплуатации зданий и сооружений, построенных по I принципу, т. е. с сохранением грунтового основания в мерзлом состоянии.

Город Якутск находится в области сплошного распространения ММП. Их мощность составляет в районе Якутска 450–475 м [*Мельников, 1963*]. К началу массового строительства в городе каменных зданий на свайных фундаментах (начало 70-х гг. XX в.) нижняя граница слоя годовых теплооборотов с нулевыми амплитудами среднегодовой температуры грунтов (−1...−5 °C) залегала на глубине около 10 м.

Местом для проведения эксперимента в Якутске в апреле 2008 г. оказалась обширная заболоченная, заваленная бытовыми отходами и изрытая мелкими карьерами территория бывшего кирпичного завода, отведенная под застройку крупного жилого массива (в квартале № 84).

Территория застройки отличалась сложными инженерно-геокриологическими условиями. Свайные фундаменты многоэтажных зданий устанавливались в зоне мерзлых и талых засоленных грунтов преимущественно песчаного состава. Ореол засоления по химическому составу солей имел отчетливо выраженное антропогенное происхождение и достигал глубины 5–7 м.

[1] В дальнейшем – показатель затухания *k*. По природе он отрицательный, но из-за использования математических функций, работающих с положительным аргументом, изменен на знак “+”.

Сводные графики термометрии (см. рис. 1, *б*) показывают, что признаки стабилизации пространственно-временных вариаций и предсказуемости температурного поля, присущие слою годовых теплооборотов в нижней его части, начинают проявлять себя с глубины 7–8 м.

Температура мерзлых грунтов на глубине 10 м изменяется в диапазоне –0,2...–2,4 °C при среднем значении –(0,9 ± 0,1) °C. Модальный показатель среднего значения составляет –0,6...–0,7 °C. Это типичная температура мерзлых грунтов, слагающих нижнюю часть грунтового основания на границе с таликом природно-техногенного генезиса. Вне сферы теплового влияния талика естественный температурный фон на глубине 10–15 м составляет –1,2...–1,4 °C. Доля такой мерзлоты порядка 30 % от изученной площади.

По данным бурения и георадиолокации, талик занимает значительную часть рассматриваемой площади и располагается в границах заболоченного понижения рельефа (обмелевшего старичного озера) под промерзшим сверху слоем грунта. Нижняя граница талика чаще всего находится на глубине 3–5 м, но в отдельных местах погружается до 7–11 м.

Материал эксперимента – 68 скважин с разовой термометрией преимущественно до 10 м, поэтому расчет показателя затухания пришлось ограничить этой глубиной, занижая на 20–40 % мощность слоя годовых теплооборотов, которая в районе Якутска составляет 12–15 м [*Скрябин и др., 1998*].

Результаты эксперимента опубликованы в сборнике научных трудов XXIX Российской школы по науке и технологиям [*Нерадовский, 2009б*].

3. *Город Нерюнгри* расположен в зоне складчатости по краевому шву Предстанового прогиба на южной окраине Алданского плоскогорья, в пределах Чульманской впадины, выполненной угленосными осадочными породами юры и нижнего мела. В южной части Чульманского плато (в бассейне среднего течения р. Чульман) на отложениях горкитской свиты согласно залегают отложения холодниканской свиты нижнего мела (песчаники с прослоями и линзами конгломератов, алевролиты, каменный уголь), выполняющие ядро крупной Нерюнгринской синклинали с интенсивными разрывными дислокациями [*Южная Якутия, 1975*]. Особый отпечаток накладывает на геологическое строение и криолитозону района работ тектонический фактор [*Булдович и др., 1976*].

Территория города занимает вершину и пологий склон водораздела рек Чульман и Беркакит с высотными отметками рельефа 773–868 м. Такие поверхности имеют мягкие мерзлотные условия с широким развитием островной мерзлоты небольшой мощности (20–50 м) и среднегодовой температурой пород, близкой к 0 °C.

Естественный температурный режим мерзлоты на обширных водораздельных поверхностях находится в сильной зависимости от процессов конвективного теплопереноса. Движение воздуха и воды с поверхности и из глубин Земли по зонам дробления и трещиноватости коренных пород приводит к уменьшению мощности островной мерзлоты вместе с увеличением мощности слоя годовых теплооборотов. Его нижняя граница залегает, по разным оценкам, на глубине 15–20 м. В целом Нерюнгринскому району свойствен сложный инженерно-геокриологический облик, главная черта которого – неоднородность и динамичность мерзлотно-грунтовых условий. Она проявляет себя в значительной глубине сезонного оттаивания–промерзания (порядка 3–6 м), при этом возможен многократный переход мерзлых пород в талое состояние и наоборот. В ходе строительства и эксплуатации зданий естественный температурный режим мерзлого грунтового основания на территории Нерюнгри был нарушен. В результате сочетания теплового воздействия техногенных и природных факторов на некоторых участках городской застройки под домами произошла полная деградация мерзлоты. На глубине 10 м температура скальных и полускальных грунтов, перешедших в талое состояние, изменялась в интервале 0–6,5 °C при двух средних модальных значениях: 0,1–0,2 и 4,0–5,0 °C. Об этом свидетельствуют сводный график термометрии скважин и гистограмма температуры грунтов (см. рис. 1, *в*). Из рис. 1, *в* также следует, что на участках с сохранившейся высокотемпературной островной мерзлотой мощностью 13–18 м среднегодовая температура грунтов (морозных песчаников) на глубине 10 м составляла –(0,4 ± 0,1) °C.

Основная трудность при проведении камерального эксперимента состояла в формировании для статистического анализа выборочной совокупности, представительной по числу скважин и широте интервала изменения температуры грунтов.

После сортировки материала по кварталам города и времени года были выделены две группы скважин. В них вошли 28 и 36 скважин с измерением температуры грунтов весной (март–май) и осенью (сентябрь–ноябрь), т. е. в экстремальные периоды года, когда волна зимнего холода или летнего тепла достигает нижней границы слоя годовых теплооборотов.

Большая часть скважин привязана к жилым домам западной и южной части города. Для расширения температурного диапазона во вторую группу были включены скважины, находящиеся за пределами жилого сектора города. Это скважины, пробуренные на шиноремонтном заводе, расположенном в понижении рельефа с высотными отметками 762–791 м.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерения температур грунтов в скважинах сделаны разными людьми, применявшими различные приборы, но одинаковым дистанционным способом с использованием полупроводниковых датчиков – терморезисторов, при этом руководствовались стандартными требованиями и правилами [*ГОСТ 25358-82, 1982*].

Регистрация сигналов георадиолокации делалась автоматизированным способом в Мирном и ручным способом в Якутске и Нерюнгри по методике многократного радиозондирования мерзлых грунтовых сред в окрестности точек поисковой сети [*Нерадовский, 2005*]. С целью более точной привязки результатов радиозондирования к данным термометрии скважин интервал между ними по времени выполнения полевых работ не превышал одного месяца.

Непрерывная регистрация сигналов выполнялась по профилям, на которых находились точки скважин, пробуренных по контурам зданий г. Мирный. Для этого использовался георадар “SIR-2000” (GSS, Inc.) с антенным модулем D200 и QF75101 (центральная частота 200–270 МГц).

Сборка сигналов в линейные группы для определения надежного (усредненного по нескольким трассам) показателя затухания делалась в окрестности точек скважин специальным приемом на стадии цифровой обработки.

Ручное измерение сигналов производилось аппаратурой 17ГРЛ-1, излучающей моноимпульс с центральной частотой 40 МГц [*Омельяненко, 2001*]. Эта техника морально устарела, но по замыслу ее создателей и некоторым своим параметрам она имеет ряд преимуществ и приспособлена для работы на застроенных территориях. В наибольшей степени это качество проявляется зимой, когда температура воздуха опускается ниже –30...–40 °С. При таких температурах другие георадары работать не могут.

Работа с 17ГРЛ-1 предусматривает наиболее эффективный способ изучения мерзлых грунтовых сред и определения характеристик их радиофизических свойств, в частности показателя затухания. Это площадное группирование точек радиозондирования в контуре простых геометрических фигур, центр которых совмещается с устьем скважин. Размер фигур должен соответствовать суммарному радиусу 1–2 зоны Френеля, который зависит от глубины изученного разреза и длины зондирующего импульса. Для Якутска из известных фигур был выбран квадрат, для Нерюнгри – равносторонний треугольник с радиусом вписанной в них окружности (зоны Френеля) 3–5 м. Измерения сигналов выполнялись в вершинах этих фигур один или два раза с поворотом антенн на 90°.

Схема сбора первичной информации аппаратурой 17ГРЛ-1 с числом измерений сигналов не более 10 не удовлетворяет общим требованиям математической статистики для получения несмещенных выборочных оценок среднего показателя затухания. Но приходится довольствоваться тем, что есть, так как большее число измерений практически невозможно из-за высокой трудоемкости полевых работ и камеральной обработки.

Ручной вариант стохастического моделирования, апробированный на экспериментальном материале из Нерюнгри, показал, что даже при небольшом числе измерений сигналов погрешность нахождения среднего показателя затухания не превышает 10 %.

Полученная оценка погрешности справедлива, надежна и достаточна для решения поставленных задач эксперимента при условии аппроксимации степенной функцией случайных вариаций амплитуды и фазы (времени задержки) электромагнитных импульсов, зарегистрированных в сигналах при различном положении и ориентации антенн 17ГРЛ-1.

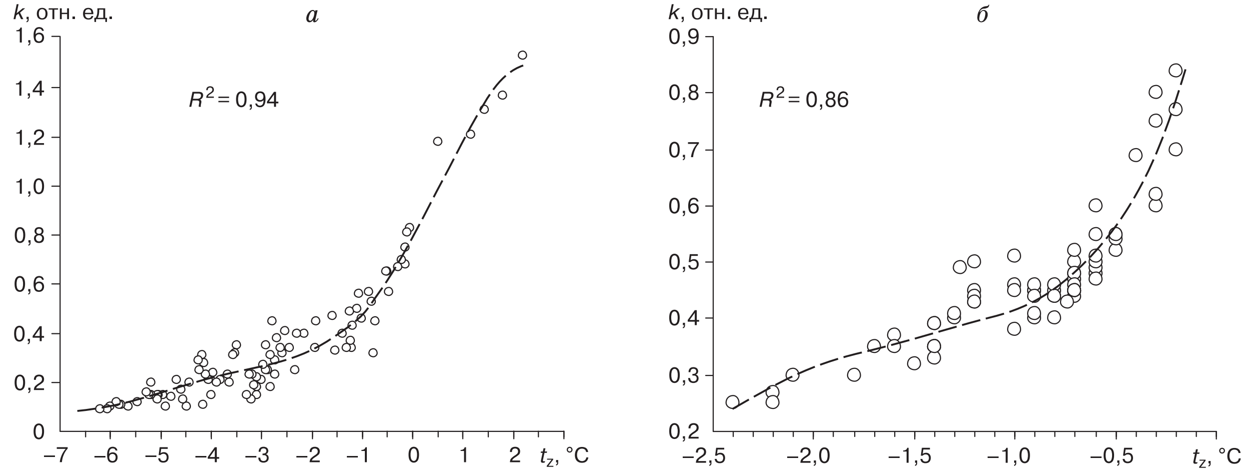
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Собранный экспериментальный материал является репрезентативным. Он дает достаточно полное представление о характере температурной зависимости динамического признака георадиолокации в освоенных районах криолитозоны Сибирской платформы с разными инженерно-геокриологическими условиями.

Главным результатом проведенных экспериментов является подтверждение ранее полученных результатов [*Нерадовский, 2005, 2007, 2009а–в*] о влиянии температурного поля многолетнемерзлых пород на затухание энергии импульсного электромагнитного поля в слое годовых теплооборотов. Судя по графикам, это влияние носит региональный характер (рис. 2).

Действительно, облако поля рассеяния точек эксперимента и линия полиномиальной регрессии показывают, что во всех изученных районах криолитозоны повышение температуры ММП, используемых в качестве грунтовых оснований инженерных сооружений, сопровождается увеличением показателя затухания амплитуды электромагнитных импульсов.

Интегральная мера этого затухания количественно оценивается по значению показателя степенной функции k и, как показали исследования в Нерюнгри, не имеет принципиальных ограничений для задания интервала глубины изучаемого грунтового основания. Он может быть любым, не выходящим за нижнюю границу слоя годовых теплооборотов.



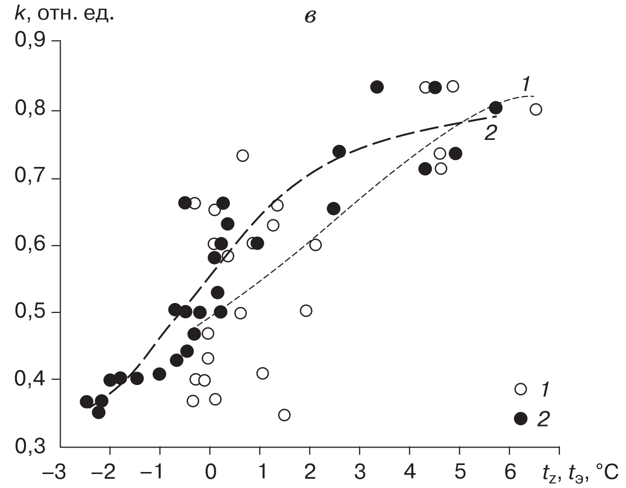


Рис. 2. Поле рассеяния экспериментальных точек и графики полиномиальной зависимости динамического показателя георадиолокации от характеристик температурного поля в слое годовых теплооборотов в различных городах Якутии:

а – Мирный, *б* – Якутск, *в* – Нерюнгри; *1* – температура грунтов на глубине 10 м (t_z), $R^2 = 0,51$; *2* – средняя температура грунтов в слое мощностью 10 м ($t_э$), $R^2 = 0,88$.

В рассматриваемом случае речь идет о корреляционной зависимости показателя затухания k от одной из характеристик температурного поля[2] t_z – температуры грунтов на глубине 10 м. Эта зависимость описывается полиномами 3–5 порядка (см. рис. 2, *а–в*). На графиках выделяются три устойчивые черты, составляющие в совокупности единый вид региональной закономерности исследуемого явления. Первая черта (проявляет себя в Мирном и Якутске) – монотонный характер температурной зависимости показателя затухания в интервале температур –1,0...–7,0 °С (см. рис. 2, *а*, *б*). При таких сравнительно низких температурах основания инженерных сооружений, сложенные скальными, полускальными и дисперсными грунтами, находятся в твердомерзлом состоянии.

На монотонном участке температурной зависимости темп изменения показателя затухания низкий. При повышении температуры на один градус прирост затухания составляет примерно 20 %. Это накладывает нежесткое ограничение на точность нахождения показателя затухания в целях количественной оценки температурного состояния твердомерзлого грунтового основания. Она не должна быть ниже 20 %.

Вторая черта – экстремальный характер графиков температурной зависимости вблизи границы фазовых переходов, т. е. в окрестности нулевой температуры. Экстремальность проявляет себя во всех случаях всплеском темпа прироста показателя затухания в диапазоне высокотемпературных мерзлых грунтов –0,1...–1,0 °С.

В области сплошного распространения многолетнемерзлых пород в Центральной и Западной Якутии (города Мирный, Якутск) экстремальный участок зависимости удовлетворительно описывается функцией полинома. При переходе в область островной мерзлоты Южной Якутии (г. Нерюнгри) с нестационарным температурным режимом в слое годовых теплооборотов ни полином, ни другие менее известные математические функции

[2] Далее просто температурная зависимость: прямая $k = f(t_z)$ и обратная $t_z = \varphi(k)$.

(например, функция Больцмана из класса сигмоидов) не справляются с корректной аппроксимацией экстремума и сглаживают его.

Третья черта выражает асимптотическое поведение температурной зависимости при переходе мерзлых пород в талое состояние, т. е. быстрый спад темпа прироста показателя затухания при температуре выше 0 °С. Это свойство полностью проявляет себя на территории Нерюнгри, где широко распространены природно-техногенные талики, но не по характеристике t_z, а по $t_э$ – средней температуре мерзлых грунтов, слагающих основание инженерных сооружений в зоне работы боковой поверхности фундаментов типа свай-стоек. В данном случае $t_э$ теряет строгость своего определения по СНиП и означает среднюю температуру мерзлых и(или) талых грунтов в слое годовых теплооборотов до глубины 10 м. Это еще одна характеристика температурного поля, имеющая значение для проектирования строительных объектов на мерзлоте, которую можно определить методом георадиолокации. Заметим, что в условиях существования на территории Нерюнгри высокотемпературной и небольшой по мощности островной мерзлоты корреляционная связь $k \to t_z$ теряет силу. В сравнении со сплошной мерзлотой, где находятся Мирный и Якутск (R^2 = 0,94–0,86), она уменьшается почти в два раза (R^2 = 0,51). Корреляция $t_z \to t_э$ также слабая (R^2 = 0,28–0,60) по всему слою годовых теплооборотов в изученные периоды года (табл. 1).

Объясняется это сложившимся нестационарным режимом теплообмена в изученном грунтовом слое между приземным слоем атмосферы и нижней частью литосферы. В результате ослабления доминирующей роли теплового потока, поступающего с поверхности Земли, над потоком, поступающим из ее недр, среднегодовая температура на нижней границе сохранившихся островов мерзлых пород, не говоря уже о природно-техногенных таликах, теряет свойство стабильности и предсказуемости.

Таблица 1. **Матрица корреляций парных связей переменных эксперимента в г. Нерюнгри**

Слой разреза	Весенний период года			Осенний период года		
	$t_э \to t_z$	$t_z \to k$	$t_э \to k$	$t_э \to t_z$	$t_z \to k$	$t_э \to k$
до 5 м	0,60	0,50	0,82	0,55	0,45	0,68
до 10 м	0,56	0,46	0,81	0,51	0,43	0,55
до 15 м	0,28	0,26	0,85	0,43	0,41	0,61

Термодинамическая особенность островной мерзлоты изменила методику изучения температурной зависимости и построения ее математических моделей. На первый план выдвинулось исследование причинно-следственной связи $k \to t_э$. Она позволяет перейти к расчетному определению характеристик температурного поля $t_э$ и t_z методом георадиолокации в любом заданном срезе глубин слоя годовых теплооборотов, а не только на его подошве.

Описанные черты температурной зависимости, проявляющие себя в разных освоенных районах криолитозоны Якутии, имеют не только научное, но и прикладное инновационное значение. Это побудило собрать материал эксперимента в единое целое с целью поиска общей для Якутии математической модели температурной зависимости, в которой роль зависимой пере-

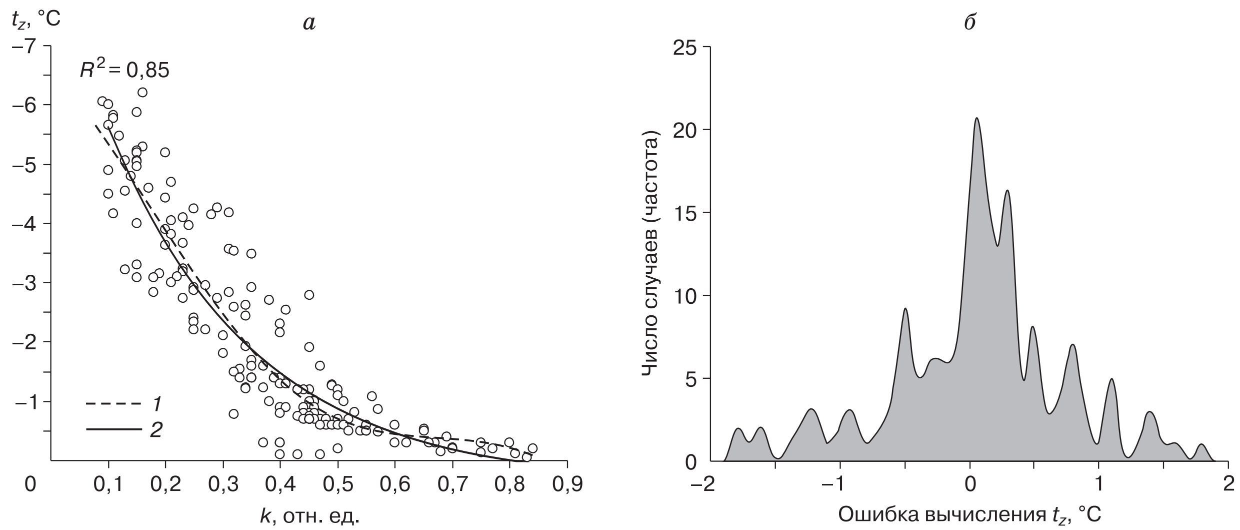


Рис. 3. Графики математической модели обратной температурной зависимости динамического показателя георадиолокации для центров освоенных районов криолитозоны Якутии (*а*) и точности работы модели по характеристике температурного поля t_z (*б*).

1 – полином 4-го порядка, *2* – экспоненциальная функция ExpAssoc.

Таблица 2. **Описательная статистика ошибок общей модели полинома 4-го порядка**

Ошибка t_z	Общая модель	Мирный	Якутск	Нерюнгри
Среднее	0,02	–0,20	0,16	0,41
Стандартная ошибка	0,05	0,08	0,03	0,16
Медиана	0,09	–0,23	0,11	0,65
Мода	0,27	н/д	0,27	1,06
Стандартное отклонение	0,698	0,787	0,281	0,868
Дисперсия выборки	0,488	0,620	0,079	0,754
Эксцесс	0,705	–0,137	0,713	3,069
Асимметричность	–0,524	0,144	0,355	–1,789
Интервал	3,8	3,6	1,5	3,5
Минимум	–2,1	–1,8	–0,5	–2,1
Максимум	1,7	1,7	0,9	1,4
Сумма	4,3	–17,9	10,8	11,4
Счет	188	91	69	28
Уровень надежности (95 %)	0,10	0,16	0,07	0,34

Примечание. н/д – недостоверные данные.

менной играет температура грунтов, а не показатель затухания. Это не имеет физического смысла, но оправдано практической необходимостью.

Такая модель была найдена в виде полинома 4-го порядка и функции ExpAssoc (рис. 3). Их формулы имеют следующий вид:

$$t_z = 64{,}153(k^4) - 109{,}710(k^3) + 47{,}560(k^2) + 7{,}112(k^1) - 6{,}435, \quad (1)$$

$$t_z = -8{,}5 + 2[4{,}44(1 - \exp(-k/0{,}255))], \quad (2)$$

где t_z, °C – температура мерзлых грунтов на глубине 10 м; k, отн. ед. – показатель затухания[3] в грунтовом слое до глубины 10 м.

Модели построены по данным, полученным в разное время года, поэтому определение k следует делать с привязкой к фактору времени, т. е. в Мирном полевые работы методом георадиолокации нужно планировать на осень (ноябрь), а в Якутске и Нерюнгри – на весну (преимущественно на апрель). Причем делать это в тех частях городской застройки, которые граничат с местами проводимых экспериментов или близких к ним по инженерно-геокриологическим условиям.

Проверка показала, что общие полиномиальные и экспоненциальные модели схожи между собой. В связи с этим дальнейший анализ приводится только для полиномиальной модели. При доверительной вероятности 95 % средняя ошибка вычисления характеристики температурного поля

Таблица 3. **Вероятностная структура ошибок обратной математической модели освоенных районов криолитозоны Якутии**

Категория точности вычисления характеристики t_z	Интервал ошибки (°C)	Вероятность (число случаев), %		
		Мирный (N = 91)	Якутск (N = 68)	Нерюнгри (N = 28)
		Модель полинома		
Высокая	±(0,0–0,2)	20	56	14
Средняя	±(0,2–0,5)	27	29	18
Низкая	±(0,5–1,0)	30	14	32
Очень низкая	Более ±1,0	23	1	36
		Модель экспоненты		
Высокая	±(0,0–0,2)	25	40	24
Средняя	±(0,2–0,5)	29	49	9
Низкая	±(0,5–1,0)	25	11	43
Очень низкая	Более ±1,0	21	Нет	24
Контрольная сумма	±(0,0–2,0)	100	100	100

Примечание. N – число скважин термометрии.

[3] Достаточно полное описание процедуры нахождения показателя затухания k приводится в монографии [*Нерадовский, 2009в*].

t_z лежит в интервале ±0,1 °С (табл. 2). При этом в половине случаев ошибки общей полиномиальной модели сосредоточены в диапазоне ±0,3 °С. Это достаточно хороший показатель точности вероятностной модели.

Центральный лепесток графика ошибки (см. рис. 3, *б*) расположен вблизи нулевого значения, что указывает на сбалансированность модели – равную вероятность завышения и занижения данных термометрии скважин.

При рассмотрении общей модели применительно к отдельно взятым городам ее сбалансированность нарушается, что проявляется в возникновении знакопеременной систематической ошибки. В Мирном она завышает значения температуры мерзлых грунтов в среднем на 0,2 °С, а в Якутске и Нерюнгри занижает на 0,2–0,4 °С. Эти сдвиги не так важны. Важнее знать долю ошибок, близких к термометрии. Это уровень примерно ±(0,3–0,5) °С.

Из анализа ошибок (табл. 3) вытекает вывод: общую модель нельзя использовать в островной криолитозоне Южной Якутии. Действительно, если в Мирном и Якутске доля ошибок, сравнимых с термометрией, составляет 56–89 %, то в Нерюнгри она недопустимо низка – 33 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждены ранее опубликованные факты [*Нерадовский, 2005, 2007, 2009а–в*] экспериментального установления влияния температурного поля на затухание электромагнитного поля в слое годовых теплооборотов сплошной и островной криолитозоны Якутии, что важно как в научном, так и в практическом аспекте. Проявление черт региональной закономерности позволяет говорить о рождении в геокриологии еще одного метода косвенного определения температуры мерзлых грунтов – радиометода. Было бы ошибочным противопоставлять радиометод методу термометрии скважин. Намного плодотворнее объединить их ценные качества: точность термометрии с низкой себестоимостью и способностью радиометода работать в условиях застроенных территорий, с целью построения полноценных мониторинговых сетей. При этом точности радиометода вполне достаточно, чтобы по массовым измерениям сигналов георадиолокации, привязанных к точкам скважин, заполняющих свободные промежутки между ними, вычислять достоверные средние показатели, а по ним строить карты изолиний температуры мерзлых грунтов. Сегодня не хватает такого подхода, чтобы производить на территории крупных населенных пунктов и других объектов долговременный контроль (мониторинг) трендовых сдвигов уровня и направленности температурного поля, происходящих в мерзлых грунтовых основаниях инженерных сооружений под влиянием климата и техногенеза.

Литература

Булдович С.Н., Мелентьев В.С., Наумов М.С., Фурикевич О.С. Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-гидрогеологических условий (на примере Нерюнгринской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба) // Мерзлотные исслед., 1976, вып. XV, с. 120–125.

ГОСТ 25358-82. Грунты. Метод полевого определения температуры. М., Госстрой СССР, 1982, 14 с.

Ефимов А.И. Температура многолетнемерзлых горных пород в окрестностях г. Мирный // Современные вопросы региональной и инженерной геокриологии (мерзлотоведения). Новосибирск, Наука, 1964, с. 63–83.

Инженерная геология СССР. В 8-ми т. Т. 3. Восточная Сибирь. М., Изд-во Моск. ун-та, 1977, 657 с.

Мельников П.И. Итоги геокриологических, гидрогеологических и инженерно-геокриологических исследований в Центральной и Южной Якутии: Доклад о работах, представленных на соискание учен. степени д-ра геол.-мин. наук. М., ИМЗ СО АН СССР, 1963, 84 с.

Нерадовский Л.Г. Изучение состояния и свойств мерзлых грунтов и криопэгов методом георадиолокации: Дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 2005, 204 с.

Нерадовский Л.Г. Изучение свойств мерзлых засоленных грунтов методом динамической георадиолокации // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 2, с. 32–39.

Нерадовский Л.Г. Влияние температуры многолетнемерзлых грунтов на затухание электромагнитной энергии // Геофизика, 2009а, № 2, с. 57–67.

Нерадовский Л.Г. Некоторые петрофизические закономерности и модели освоенных районов криолитозоны Якутии // Наука и технологии: Тр. XXIX Рос. шк. М., РАН, 2009б, с. 122–134.

Нерадовский Л.Г. Методическое руководство по изучению многолетнемерзлых пород методом динамической георадиолокации // Избр. труды Рос. школы по науке и технологиям. М., РАН, 2009в, 337 с.

Омельяненко А.В. Научно-методические основы георадиолокации мерзлых горных пород: Дис. ... д-ра техн. наук. Якутск, 2001, 359 с.

Руководство по применению полупроводниковых терморезисторов для геотермических измерений / В.Т. Балобаев, Б.В. Володько, В.Н. Девяткин и др. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1985, 48 с.

Скрябин П.Н., Варламов С.П., Скачков Ю.Б. Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов района Якутска. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1998, 144 с.

Смирнов В.В. К вопросу изучения изменений мерзлотно-инженерно-геологических условий в результате освоения территорий // Мерзлотные исслед., 1967, вып. VIII, с. 179–185.

Снегирев А.М., Бойков С.А. Инженерно-геокриологические проблемы эксплуатации зданий и сооружений г. Мирный // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 2, с. 53–60.

Спектор В.В., Бакулина Н.Т., Спектор В.Б. Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на “Якутском разбое” // Геоморфология, 2008, № 1, с. 87–94.

Южная Якутия: мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, 444 с.

Поступила в редакцию
15 марта 2010 г.