

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 550.360 + 550.379

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(12-22)

РЕГИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ
КРИОЛИТОЗОНЫ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА:
ОПИСАНИЕ В ИСКУССТВЕННО СОЗДАВАЕМЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Л.Г. Нерадовский

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

Представлены результаты обобщения натуральных экспериментов, выполненных методами наземной геоэлектрики с целью изучения поведения температурного поля криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока. Установлена корреляционная связь параметра амплитудного ослабления электромагнитных полей в слое годовых теплооборотов с температурой мерзлых грунтов в этом слое. В изученном регионе эта связь корректно описывается моделью в виде уравнения логистической функции. Приведены результаты апробации модели на конкретных объектах инженерно-строительных изысканий. Рассмотрены вопросы ее применения в труднодоступных и малообжитых районах для начальной диагностики теплового состояния мерзлых грунтов и последующего контроля изменения этого состояния.

Слой годовых теплооборотов, мерзлые грунты, температура, термометрия скважин, параметр амплитудного ослабления, методы георадиолокации и индукции, региональная модель

TEMPERATURE BEHAVIOR OF PERMAFROST IN EAST SIBERIA AND RUSSIAN FAR EAST:
A REGIONAL MODEL IN CONTROLLED-SOURCE ELECTROMAGNETIC FIELDS

L.G. Neradovskii

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

The paper presents synthesis of land-based resistivity surveys for estimation of the thermal behavior of permafrost in East Siberia and the Russian Far East. The approach is based on correlation between the attenuation rate of electromagnetic fields in the active layer and ground temperatures. In the study area, this correlation shows a satisfactory fit to the logistic function, which makes base for a regional model. The model has been tested on several specific engineering objects. It is applicable to assessment of the initial thermal state of permafrost and its subsequent changes in hardly accessible and scarcely populated areas.

Permafrost, layer of annual temperature fluctuations, temperature, borehole thermometry, amplitude attenuation parameter, ground penetrating radar, induction method, regional model

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху бурного развития геоэкологии П.Ф. Швецов предполагал, что кардинальное изменение условий теплообмена с ростом температуры в слое годовых теплооборотов (СГТ) может привести к полному уничтожению вечной мерзлоты [Швецов, 1959]. Большое значение этому слою придавал А.Т. Акимов, называя его “фабрикой” криогенных процессов [Акимов, 1971, с. 10]. Действительно, в этом небольшом по мощности слое (обычно 10–20 м) протекают сложные физические, химические и механические процессы переноса тепла, вещества и криогенного метаморфизма. В природных условиях эти процессы генери-

руются единственным источником и первопричиной – тепловой энергией Солнца. На застроенных территориях к ней добавляется внешняя и внутренняя тепловая энергия антропогенных и техногенных источников. Она, хотя и ничтожна по сравнению с энергией Солнца, но в ряде случаев играет определяющую роль в сфере теплового взаимодействия мерзлых грунтов с фундаментами инженерных сооружений. Все указанные источники тепловой энергии порождают периодический (в сезонных циклах) и непериодический нагрев по глубине мерзлых грунтов с нулевым или ненулевым тепловым балансом. Постоянный избыток

тепловой энергии в этом балансе обуславливает рост температуры мерзлых грунтов, который в свое время приводит к частичной деформации или полному разрушению инженерных сооружений. Поэтому для сохранения инженерных сооружений вместе с криогенными ресурсами вечной мерзлоты необходимо постоянно контролировать динамику теплового состояния мерзлых грунтов в СГТ не только на застроенных территориях, но и в природных условиях. Решить эту задачу только методом термометрии скважин невозможно из-за высокой стоимости буровых работ и сложности сохранения скважин в сетях мониторинга в течение всего времени эксплуатации инженерных сооружений. Кроме того, применение метода термометрии скважин на застроенных территориях сильно затруднено, а получаемая точечная информация о температуре мерзлых грунтов носит ограниченный характер в связи с неравномерностью и недостаточной плотностью сети теплового мониторинга. При этом картина изменчивости температуры, а значит, и теплового поведения мерзлых грунтов между точками опорных скважин остается неизвестной.

Подходы к решению этих проблем разрабатываются Институтом мерзлотоведения (ИМЗ) им. П.И. Мельникова СО РАН. Полученные автором настоящей работы в лаборатории инженерной геокриологии этого института результаты полевых экспериментов с привлечением и систематизацией материалов исследований в данном направлении других научных учреждений установили корреляционную связь между температурой и характеристиками электросейсмоакустических свойств образцов и массивов мерзлых грунтов. Существование этой связи послужило физической основой для изучения теплового поведения мерзлых грунтов в искусственно создаваемых электрических и упругих полях методами наземной геоэлектрики и сейсмоакустики в природных условиях и на застроенных территориях криолитозоны России. В общем случае выявленные корреляции дали возможность получить качественные и количественные оценки реакции мерзлых грунтов на электромагнитное и сейсмоакустическое воздействия. Эта реакция принимает вид согласованной пространственно-временной изменчивости температуры и комплексной нормированной характеристики электросейсмоакустических свойств нагреваемых или охлаждаемых образцов и массивов мерзлых грунтов [Нерадовский, 2014а]. Аналогичным образом проявляется в СГТ криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока реакция мерзлых грунтов на возбуждение высокочастотными импульсными и гармоническими электромагнитными полями. Настоящая работа посвящена оценке научной значимости этой част-

ной реакции, описываемой региональной моделью, а также вопросам ее практического применения, которые остались неопубликованными.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материал накоплен за длительный период проведения натуральных экспериментов (1986–2012 гг.) методами георадиолокации и дистанционного индуктивного зондирования (далее – метод индукции) в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока преимущественно на территории Республики Саха (Якутия) и частично Забайкальского края и Амурской области. Места проведения экспериментов в Якутии показаны на карте (рис. 1). Из-за мелкого масштаба карты на ней не показаны многочисленные трассы линейных сооружений (автодорог, газопроводов, водоводов, линий электропередач и связи, взлетно-посадочных полос аэродромов и пр.), где были проведены эксперименты.

Объем фактического материала очень большой и не весь обработан. Поэтому для дальнейшей работы с целью построения региональной модели использована только часть обработанных данных по объектам инженерно-строительных изысканий (табл. 1), причем таким образом, чтобы представить модель в максимально возможном разнообразии инженерно-геокриологических условий и широком диапазоне изменчивости температуры дисперсных, полускальных и скальных мерзлых грунтов.

В отобранные данные вошли 1088 парных значений температуры мерзлых грунтов и параметра амплитудного ослабления электромагнитных полей (k), который представляет собой меру относительной скорости затухания в СГТ сигналов, измеряемых методами георадиолокации и индукции. Чтобы отличить эмпирический параметр k от теоретического коэффициента затухания электромагнитных полей, он назван параметром амплитудного ослабления. Методика его определения описана ниже.

МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В методе полупроводниковой термометрии скважин температура мерзлых грунтов определялась по ГОСТ 25358-82 [1982] путем измерения мостами постоянного тока и другими приборами электрического сопротивления терморезисторов марки “ММТ-4” с последующим переводом по градуировочным таблицам результата измерения в значения температуры с точностью до 0.01 °С [Руководство..., 1985]. Для построения региональной модели использовались значения температур, полученные на максимальной глубине бурения скважин, которая изменялась от 8 до 15 м.

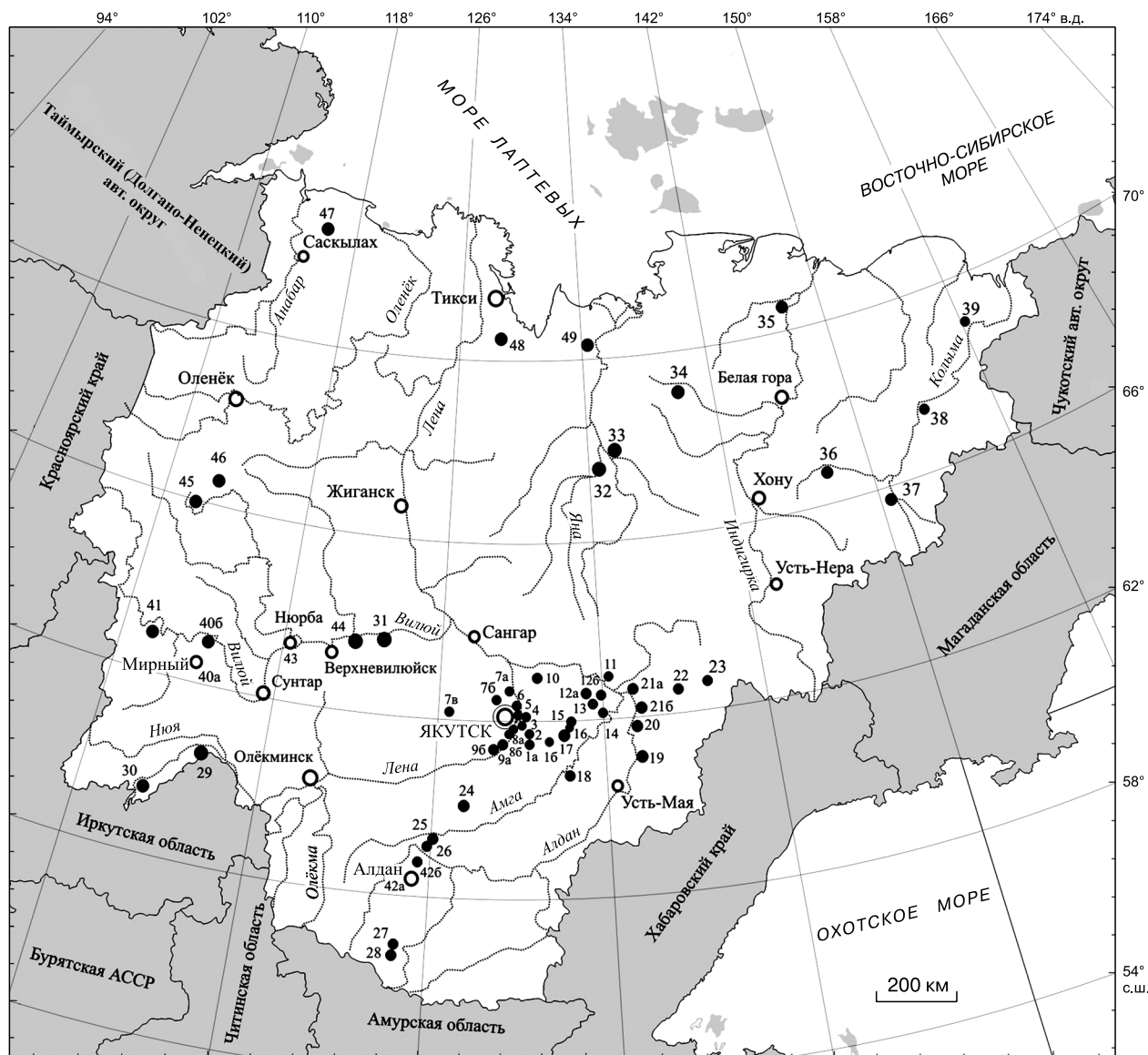


Рис. 1. Карта проведения экспериментов в освоенных районах криолитозоны Якутии по изучению в период 1986–2012 гг. связи температуры с характеристиками скорости затухания сигналов электромагнитных зондирований:

1а – Ломтука; 1б – Бютейдя; 2 – Майя; 3 – Павловск; 4 – Нижний Бестях; 5 – Жатай; 6 – Кангалассы; 7а – Намцы; 7б – Маган; 7в – Бердигестях; 8а – Хатассы; 8б – Табага; 9а – Покровск; 9б – Мохсоголлох; 10 – Дюся; 11 – Крест-Хальджай; 12а – Томтор; 12б – Уолба; 13 – Ытык-Кюёль; 14 – Харбаллах; 15 – Чурапча; 16 – Диринг; 17 – Туора-Кюёль; 18 – Амга; 19 – Кюшцы; 20 – Охотский перевоз; 21а – Хандыга; 21б – Джебарики-Хая; 22 – Кидерики; 23 – золоторудное месторождение “Нежданское”; 24 – Олень; 25 – Кюргеллях; 26 – Томмот; 27 – Чульман; 28 – Нерюнгри; 29 – Ленск; 30 – Витим; 31 – Кысыл-Сыр; 32 – Багагай; 33 – Адыча; 34 – Депутатский; 35 – Чокурдах; 36 – Угольный; 37 – Зырянка; 38 – Средне-Колымск; 39 – Колымское; 40а – Мирный; 40б – Светлый; 41 – Чернышевский; 42а – Алдан; 42б – Нижний Куранах; 43 – Нюрба; 44 – Вилюйск; 45 – Айхал; 46 – Удачный; 47 – Эбеллях; 48 – Тиксинская АЭС; 49 – золоторудное месторождение “Кючус”.

Работы методами георадиолокации и индукции выполнялись в окрестности скважин термометрии с изменением местоположения и азимутальной ориентации приемных и передающих антенн. Параметр k определялся как среднее значение по многократным измерениям сигналов гео-

радиолокации и индукции [Нерадовский, 2009; Способ..., 2011]. Такая методика разработана для изучения теплового поведения криогенных систем переходного типа [Хименков, 2002], частью которых являются мерзлые грунты с неравновесной термодинамикой в СГТ. Эта методика трудоемка и

Таблица 1. Список объектов натуральных экспериментов

| Кол-во скважин | Регион криолитозоны | Населенный пункт, объект эксплуатации | Год эксперимента | T_{8-15} , °C |
|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------|
| <i>Метод георадиолокации</i> | | | | |
| 59 | СВЯ | пгт. Зырянка | 1987 | +0.5...–4.4 |
| 35 | ЦЯ | г. Якутск, Зеленый Луг | 1987 | +0.1...–2.4 |
| 30 | ЮЯ | ж/д ст. Кюргеллях | 1990 | –0.3...–5.4 |
| 120 | ЮЯ | г. Нерюнгри | весна 1988–1990 | +6.8...–3.2 |
| 67 | ЦЯ | ж/д ст. Правая Лена–ст. Н-Бестях | 1990 | ±0.0...–3.8 |
| 93 | ЦЯ | г. Якутск, НЦМ | весна–осень 2001–2003 | +7.6...–4.4 |
| 96 | ЗЯ | г. Мирный | 2007 | +2.2...–6.2 |
| 18 | ЦЯ | стадион Юность | 2007 | –0.3...–4.3 |
| 69 | ЦЯ | квартал 84 г. Якутска | 2008 | +0.2...–2.7 |
| 11 | ЦЯ | г. Якутск, Сергелляхское шоссе | 2008 | –0.5...–5.8 |
| 57 | ЦЯ | мониторинг ИМЗ СО РАН г. Якутска | 2010 | +10.0...–6.5 |
| 47 | ЦЯ | г. Якутск, ТЭЦ | 2005 | +12.4...–4.0 |
| <i>Метод индукции</i> | | | | |
| 11 | СВЯ | пгт. Черский, р. Колыма | 1988 | –3.8...–6.2 |
| 33 | СВЯ | пгт. Тикси, Тиксинская АЭС | 1989–1990 | –4.4...–11.7 |
| 49 | ЦЯ | ж/д ст. Правая Лена–ст. Н-Бестях | 1990 | +1.2...–3.8 |
| 29 | СВЯ | месторождение алмазов Биллях | 2000 | –1.1...9.6 |
| 21 | ЦЯ | автодорога АЯМ | 2006 | –1.1...–4.0 |
| 23 | СВЯ | месторождение рудного золота “Кючус” | 2007 | –4.7...–8.5 |
| 109 | ЦЯ | квартал 84 г. Якутска | 2008 | +2.5...–6.0 |
| 31 | ЦЯ | ж/д Томмот–Якутск | 2011 | +0.2...–4.5 |
| 16 | ЦЯ | пески АЯМ, ж/д Томмот–Якутск | 2011 | –0.1...–0.9 |
| 34 | ЦЯ | автодорога “Виллюй” | 2012 | –0.5...–3.8 |
| 30 | Забайкальский кр., Амурская обл. | автодорога Р-297 “Амур” | 2013 | +3.4...–1.2 |

Примечание. СВЯ – Северо-Восток Якутии; ЦЯ – Центральная Якутия; ЗЯ – Западная Якутия; НЦМ – Национальный центр медицины, где Якутская поисково-съёмочная экспедиция выполняла мониторинг опасных экзогенных процессов и явлений; АЯМ – Амуро-Якутская автомагистраль; T_{8-15} – температура на глубине 8–15 м.

сложна, но в сравнении с распространенными методиками одноразовых измерений она гарантирует достоверный результат исследования стохастического процесса распространения в неоднородных и анизотропных мерзлых грунтах электромагнитных полей.

Сигналы, изучаемые методом моноимпульсной¹ георадиолокации, представляли собой последовательную во времени измерений совокупность значений амплитуд зондирующего импульса и импульсов напряженности электрической составляющей электромагнитного поля, отраженных от границ мерзлых грунтов. Измерение амплитуд импульсов выполнялось георадарами с антеннами, работающими на центральной частоте от 30 до

400 МГц и обеспечивающими изучение мерзлых грунтов до максимальной глубины залегания нижней границы СГТ (30–50 м). Методики измерений, обработки и интерпретации сигналов георадиолокации описаны в учебном пособии [Владов, Старовойтов, 2005] и методическом руководстве [Нерадовский, 2009].

Сигналы, исследуемые методом индукции, представляли собой значения амплитуд H_z – вертикальной составляющей напряженности гармонического магнитного поля вертикального магнитного диполя (ВМД)². Этот излучающий диполь и приемный диполь конструктивно выполнены в виде круглых антенн с внутренним и внешним диаметрами 0.30–0.32 м.

¹ В целом, георадиолокацию с некоторыми допущениями можно считать моноимпульсной, хотя форма и длительность моноимпульса, излучаемого антенной георадара с одним колебанием электрического тока, искажается грунтовой средой.

² Диполь ориентирован в горизонтальной плоскости, что соответствует направлению вектора магнитного момента диполя по вертикальной оси. Измерение одной вертикальной составляющей объясняется тем, что в отличие от горизонтальной составляющей она менее подвержена влиянию неровностей рельефа местности, промышленных помех и несет основную информацию о результате процесса затухания в СГТ суммарного первичного и вторичного поля ВМД по глубине.

Измерения H_z выполнялись на частоте 1.125 МГц³ аппаратурой “СЭМЗ” [Лебедев и др., 1991] по методике изучения фона ВМД с расположением диполей на высоте около 1 м над поверхностью земли [Задегиголова, 1998]. Излучающий диполь неподвижно устанавливался в горизонтальном положении на геодезической треноге около скважины термометрии. Приемный диполь в таком же горизонтальном положении через 5 м удалялся от излучающего диполя на расстояние от 5 до 50 м.

Такая схема измерений в условиях широкой изменчивости эффективного электрического сопротивления (100–10 000 Ом·м) мерзлых грунтов обеспечила изучение их теплового поведения в СГТ до глубины термометрии скважин 10 м.

Обработка сигналов индукции состояла в аппроксимации степенной функцией закономерного уменьшения амплитуд H_z в зависимости от расстояния между излучающим и измерительным диполями.

В отличие от экспоненциальной функции, которая используется в теоретических оценках коэффициента затухания электромагнитных полей в идеальной модели однородного изотропного нижнего полупространства, степенная функция по результатам многообразных измерений сигналов георадиолокации и индукции с высокой точностью аппроксимирует этот же процесс в реальной грунтовой модели нижнего анизотропного полупространства – мерзлых грунтах СГТ. Именно поэтому показатель степенной функции принят за количественную оценку k .

Метрولوجическая точность этой оценки неизвестна из-за невозможности провести сравнение полевых значений с истинным значением k мерзлых грунтов. Однако статистическая оценка k известна [Нерадовский, 2009]. Применительно к методу георадиолокации высокая относительная точность оценки k , равная $\pm(1-5) \%$, достигается при записи сигналов с линейной плотностью 20 трасс на метр по четырем профилям длиной по 1 м в двух перпендикулярных азимутах вблизи скважины или топопикета на расстоянии 3–5 м. Что касается метода индукции, то для него исследования статистической оценки точности k пока не выполнены. Поэтому для этого метода точность оценки k приравнивалась к точности контрольных измерений H_z , которая изменялась от 0.3 до 7.7 % при среднем значении 4.4 %. Такие показатели точности удовлетворяют требованиям практики [Инструкция..., 1984]. Следует заметить, что при работе на застроенных территориях из-за влияния индустриальных помех точность полевых

измерений может снижаться до 15–30 %, но даже эти неблагоприятные условия не мешают достигать удовлетворительного качества результатов изучения теплового поведения мерзлых грунтов.

В методах георадиолокации и индукции параметр k имеет размерность нс^{-1} и м^{-1} [ГОСТ 8.417-2002, 2002]. Поэтому для рассмотрения в региональной модели с большим диапазоном изменения абсолютных значений параметра k их нужно привести в единую шкалу относительных значений. Сделано это общепринятым способом нормировки, т. е. делением конкретных значений k на максимальные значения (1.41 нс^{-1} , 6.06 м^{-1}).

ОПИСАНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

В исходном виде модель представляет собой график обобщенного поля рассеяния нормированных значений параметра k , построенный в направлении нагрева СГТ Восточной Сибири и Дальнего Востока с ростом температуры мерзлых грунтов на максимальной глубине термометрии скважин 8–15 м (рис. 2). Эта модель отображает общую реакцию основных литотипов мерзлых грунтов (дисперсных, полускальных, скальных) на электромагнитное возбуждение импульсным полем с измерением сигналов георадиолокации или гармоническим полем ВМД с измерением сигналов индукции. В этой реакции проявляется результат суммарного влияния случайных (вероятностных) факторов негеологической, мерзлотно-грунтовой природы и детерминированного (определяющего) теплового фактора на процесс затухания в СГТ электромагнитных полей. Действие теплового фактора доминирует над всеми случайными факторами, порождая согласованное изменение температуры и параметра k . В противном случае невозможно было бы увидеть корреляционный след параметра k в области отрицательных значений температур. В области положительных значений температур корреляционный след k становится менее плотным и теряет видимость главным образом из-за потери доминирующей роли теплового фактора и отчасти по причине меньшего числа определений параметра k в этой области.

Для раздельного изучения температурной динамики параметра k в СГТ общая региональная модель разделена на две части, состоящие из данных методов георадиолокации и индукции. По этим данным сделана агрегация температурных рядов путем осреднения их значений в соответствующих интервалах равномерного разбиения диапазона изменчивости нормированных значений k (0.0–0.1, 0.1–0.2, ..., 0.9–1.0). По результатам агрегации (табл. 2, 3) построены графики частных

³ На этой частоте, как показывает практика, параметр амплитудного ослабления H_z оптимален по чувствительности к изменению свойств мерзлых грунтов в пределах СГТ до наиболее часто изучаемой методом термометрии скважин глубины 10 м.

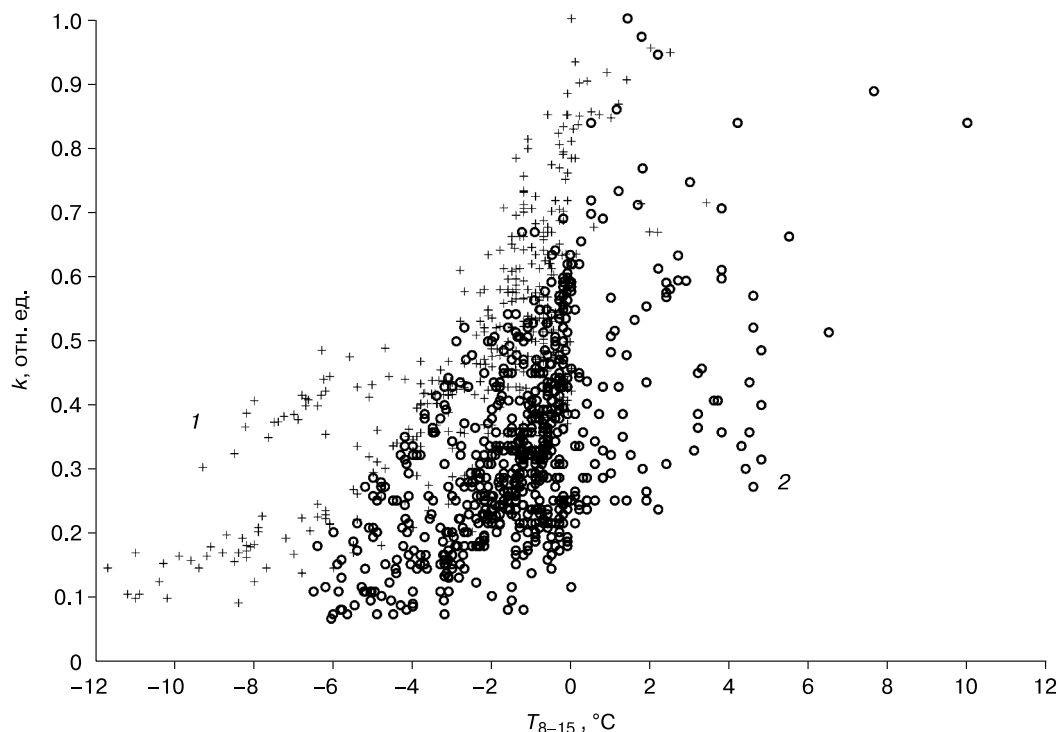


Рис. 2. Общая региональная модель связи значений нормированного параметра амплитудного ослабления (k) сигналов индукции (график 1) и георадиолокации (график 2) с температурой мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов на глубине 8–15 м (T_{8-15} , °C).

Таблица 2. Агрегированные значения температуры мерзлых грунтов по данным метода георадиолокации

| k , отн. ед. | Среднее | Медиана | Мода | Станд. отклонение | Мин. | Макс. | Кол-во определений | Уровень доверия 95 % |
|----------------|---------|---------|------|-------------------|------|-------|--------------------|----------------------|
| 0.078 | -4.2 | -4.5 | -4.0 | 1.5 | -6.1 | -1.2 | 22 | 0.7 |
| 0.163 | -3.0 | -3.0 | -3.1 | 1.7 | -6.5 | 0.0 | 111 | 0.3 |
| 0.248 | -1.5 | -1.4 | -1.4 | 1.6 | -5.4 | 4.6 | 203 | 0.2 |
| 0.333 | -1.0 | -1.0 | -0.7 | 1.6 | -4.3 | 4.8 | 173 | 0.2 |
| 0.447 | -0.6 | -0.6 | -0.3 | 1.5 | -3.4 | 4.8 | 95 | 0.3 |
| 0.546 | 0.2 | -0.2 | -0.2 | 1.7 | -2.7 | 6.5 | 65 | 0.4 |
| 0.631 | 0.7 | 0.0 | -0.1 | 1.7 | -1.2 | 5.5 | 18 | 0.9 |
| 0.723 | 2.0 | 1.7 | - | 1.2 | 0.5 | 3.8 | 6 | 1.3 |
| 0.837 | 4.7 | 4.2 | - | 4.1 | 0.5 | 10 | 5 | 5.1 |
| 0.972 | 1.8 | 1.8 | - | 0.4 | 1.4 | 2.2 | 3 | 1.0 |

Таблица 3. Агрегированные значения температуры мерзлых грунтов по данным метода индукции

| k , отн. ед. | Среднее | Медиана | Мода | Станд. отклонение | Мин. | Макс. | Кол-во определений | Уровень доверия 95 % |
|----------------|---------|---------|------|-------------------|-------|-------|--------------------|----------------------|
| 0.096 | -9.9 | -10.2 | - | 1.3 | -11.0 | -8.4 | 3 | 3.3 |
| 0.165 | -8.3 | -8.3 | -8.2 | 2.0 | -11.7 | -3.0 | 31 | 0.7 |
| 0.238 | -4.9 | -5.0 | -6.2 | 1.8 | -7.9 | -2.1 | 32 | 0.6 |
| 0.358 | -3.5 | -3.4 | -0.6 | 2.6 | -9.3 | -0.1 | 59 | 0.7 |
| 0.434 | -2.3 | -2.1 | -0.3 | 1.9 | -8.0 | 0.0 | 108 | 0.4 |
| 0.536 | -1.2 | -1.2 | -1.4 | 0.6 | -2.8 | -0.2 | 73 | 0.2 |
| 0.640 | -0.8 | -0.7 | -0.7 | 0.9 | -2.8 | 2.2 | 46 | 0.3 |
| 0.729 | -0.4 | -0.4 | -1.2 | 1.1 | -1.7 | 3.4 | 25 | 0.4 |
| 0.848 | 0.1 | 0.0 | 0.2 | 0.6 | -1.1 | 1.2 | 17 | 0.3 |
| 0.924 | 1.2 | 1.2 | - | 0.9 | 0.1 | 2.5 | 6 | 1.0 |

(пометодных) региональных моделей (рис. 3). Их аппроксимация разными математическими функциями установила, что для феноменологического описания теплового поведения мерзлых грунтов на территории Республики Саха (Якутия), Забайкальского края и Амурской области лучше всего подходит уравнение логистической функции, входящей в класс сигмоидальных функций. Общая запись уравнения логистической функции имеет вид

$$k_1 = \left[(a_0 + a_1) / (1 + a_2 \exp(a_3 t)) \right] + \delta,$$

где t – температура мерзлых грунтов, °C; k – параметр амплитудного ослабления, нс⁻¹ (или м⁻¹); a_0 – a_3 – эмпирические коэффициенты, зависящие от инженерно-геологических условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений; δ – случайная ошибка.

Для рассматриваемых данных методов георадиолокации и индукции значения a_0 – a_3 и δ не определялись, поскольку для достижения поставленной цели (изучения возможности использования региональной модели в диагностике теплового состояния мерзлых грунтов) достаточно было графического материала (см. рис. 3).

Важно отметить, что уравнение логистической функции есть наиболее простая аналитическая запись общего закона, широко применяемого в теории вероятности, грунтоведении, экологии, теории катастроф и других областях знаний для изучения эволюционно медленного или катастрофически мгновенного поведения и развития природно-технических систем между двумя крайними состояниями (начальным и конечным).

Таким образом, региональную модель логично рассматривать как частную форму общего закона, описывающего в электромагнитных полях

динамику теплового поведения грунтов в СГТ между мерзлым и талым состояниями. В таком качестве региональная модель логистического типа становится физически корректной, и ее можно признать важной частью синтезированных знаний для науки криософии Земли, принципы построения и направления развития которой заложены и развиваются В.П. Мельниковым с соавт. [2013].

Рассмотрим три основных стадии теплового поведения нагреваемых мерзлых грунтов в СГТ, которые выделены по скорости изменения или темпу роста параметра k и наблюдаются на графиках частных региональных моделей (см. рис. 3).

Первая стадия (участок АВ) – монотонно медленный рост параметра k с темпом 0.05 отн. ед./°C в интервале сравнительно низких и умеренных температур мерзлых грунтов –1...–12 °C. В этой начальной стадии теплового поведения грунты находятся в устойчивом твердомерзлом состоянии, но по мере роста температуры оно незаметно становится все более неустойчивым вместе с ухудшением механической прочности. При этом мерзлые грунты все еще остаются вполне пригодными в качестве устойчивых и надежных оснований для строительства инженерных сооружений.

Вторая стадия (участок ВС) – экстремальный рост значений k с темпом 0.247 отн. ед./°C при превышении температуры мерзлых грунтов выше –1.4 °C (по данным георадиолокации) и –1.2 °C (по данным индукции). На этой стадии запускается лавинообразный процесс фазового перехода льда в воду, вследствие чего мерзлые грунты оказываются в критически неустойчивом тепловом состоянии. По данным Н.А. Цытовича [1945], на этой стадии скорость перехода льда в воду в мерзлых дисперсных грунтах песчано-глинистого

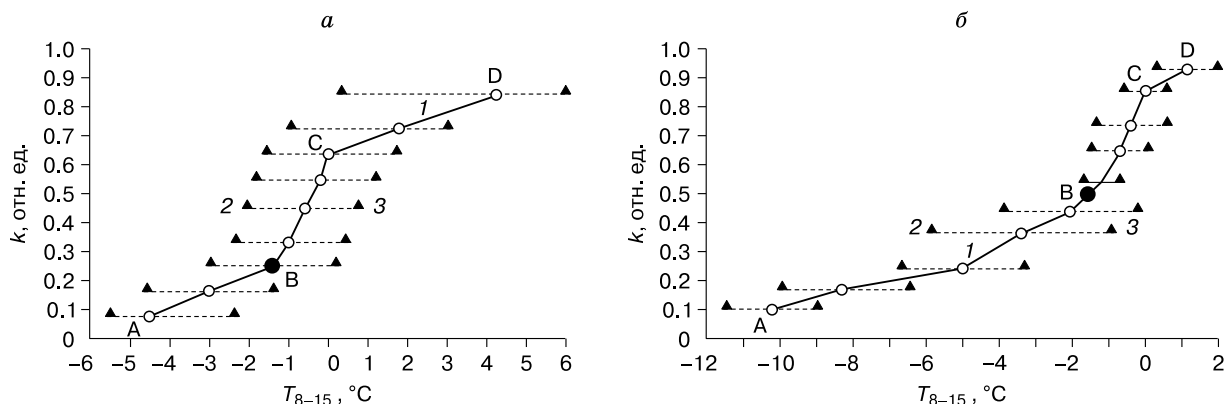


Рис. 3. Частные агрегированные региональные модели связи средних медианных значений параметра k сигналов георадиолокации (а) и дистанционного индуктивного зондирования (б) с температурой мерзлых грунтов на глубине 8–15 м:

1 – график зависимости средних медианных значений параметра k от температуры; 2, 3 – границы изменчивости средней температуры между минимальными и максимальными значениями на уровне доверительной вероятности 70 %. Пояснения в тексте.

состава максимальна и превышает 1 % на 1 °С. В незасоленных дисперсных грунтах песчаного состава и прочных скальных грунтах переход происходит быстро при температуре выше –0.5...–1.0 °С. В засоленных дисперсных грунтах глинистого состава и слабопрочных полускальных грунтах переход происходит медленнее при более низких температурах (–3...–5 °С). При этом в первом случае темп роста параметра k выше, а границы интервала роста более отчетливы, чем во втором случае.

Третья стадия (участок CD) – асимптотический рост параметра k к некоторому постоянному значению с темпом 0.059 отн.ед./°С. На этой стадии мерзлые грунты находятся в талом состоянии.

Таким образом, наблюдая за динамикой темпа роста параметра k , можно последовательно решить две задачи. Во-первых, в текущий момент времени сделать диагностику начального теплового поведения мерзлых грунтов на площади или трассе исследуемого инженерного сооружения. Во-вторых, осуществить в заданном интервале времени контроль изменчивости теплового поведения мерзлых грунтов на этапах строительства и эксплуатации инженерного сооружения. При решении этих задач надо опираться не на исходный фактический материал, состоящий из случайных вариаций параметра k , в которых легко запутаться, а на результат цифровой фильтрации. Речь идет об изменчивости средних значений k , которые рассматриваются как закономерные тенденции или разного порядка пространственные либо временные тренды. Эти данные являются основой для принятия интерпретационных решений о фоновом и аномальном тепловом поведении мерзлых грунтов. При этом неоднозначность решений, обусловленная некорректностью решения обратных задач геофизики, существенно снижается, а эффективность растет при использовании предварительно составленных карт мерзлотной съемки и инженерно-геологического районирования местности, построенных по принципу ключевых участков [Кудрявцев и др., 1979]. При необходимости геологические характеристики участков местности с аномальными значениями k уточняются дополнительным бурением контрольных скважин.

При контроле теплового поведения мерзлых грунтов на стадиях мониторинговых работ надежность интерпретационных решений всегда выше, чем на стадии диагностики, в силу того что временная динамика параметра k изучается на площадном или линейном инженерном сооружении с уже известным и неизменным строением и составом мерзлых грунтов. Однако и здесь нужна осторожность в оценке теплового поведения мерзлых

грунтов, так как под влиянием разных факторов влажность (льдистость), засоленность и другие свойства могут измениться неконтролируемым образом. Большую помощь в отбраковке таких изменений оказывают метеорологические данные (приземная температура воздуха, количество дождевых осадков, мощность снежного покрова), а также данные о растительности, рельефе местности и глубине сезонного оттаивания мерзлых грунтов.

АПРОБАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Цель апробации модели состояла в доказательстве возможности ее практического применения в труднодоступных и малообжитых районах Северо-Востока Якутии, где быстрая организация проектно-изыскательских работ встречает порой непреодолимые трудности. Именно в таких суровых природных условиях с опережением буровых работ и термометрии скважин методами георадиолокации и индукции ожидается максимально возможная экономическая эффективность региональной модели как инструмента начальной объектно-локальной диагностики относительной изменчивости по площади теплового поведения мерзлых грунтов.

Первая апробация модели сделана на участке железнодорожной (ж/д) станции Н-Бестях, расположенной в пределах Лено-Амгинского междуречья⁴ Центрально-Якутской низменности. Разрез грунтового основания станции до глубины 10–20 м сложен мерзлыми песками золотого и аллювиального генезиса с межмерзлотными таликами. Благодаря их влиянию пески имеют высокую температуру, которая на глубине 10 м изменяется от –0.1 до –0.5 °С.

Вторая апробация модели выполнена на Северо-Востоке Якутии в пределах Янского плоскогорья, где на бортах долины руч. Кючус планируется построить карьер добычи рудного золота. Разрез долины имеет сложное строение с высокой изменчивостью свойств мезозойских терригенных полускальных и скальных грунтов (алевролитов, песчаников, аргиллитов) и перекрывающей толщи делювиально-элювиальных и озерно-аллювиальных дисперсных грунтов песчано-глинистого и гравийно-галечникового состава с включением большого числа полигенетических залежей подземных льдов. Мощность толщи достигает 30–60 м. По данным бурения разведочных скважин, температура мерзлых грунтов в СГТ до глубины 10 м изменяется от –2.0 до –11.0 °С.

Третья апробация модели осуществлена в Забайкальском крае и Амурской области на автодороге “Амур” (Чита–Хабаровск). Ее основанием в

⁴ Исчерпывающее описание природных условий и инженерно-геологических особенностей Лено-Амгинского междуречья дано в работе П.А. Соловьева [1959].

Таблица 4. Точность прогнозных оценок температуры мерзлых грунтов

| Инженерный объект | k , отн. ед. | Температура, °С | | Абс. разность оценок температуры, °С |
|-------------------|----------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|
| | | Термометрия скважин | Региональная модель | |
| “Н-Бестях” | Мин. 0.33 | -0.7 | -3.8 | -3.1 |
| “Н-Бестях” | Макс. 0.41 | -0.1 | -2.4 | -2.3 |
| “Ключус” | Мин. 0.33 | -8.5 | -3.8 | 4.7 |
| “Ключус” | Макс. 0.48 | -4.5 | -1.7 | 2.8 |
| “Амур” | Мин. 0.48 | -0.9 | -1.6 | -0.7 |
| “Амур” | Макс. 0.61 | 2.5 | -0.8 | -1.7 |

Забайкальском крае служат полускальные и скальные грунты (граниты палеозойского и архейского возраста, гранитоиды и останцы осадочных пород юрского возраста). Температура грунтов на глубине 6–9 м изменяется от -0.3 до -1.3 °С. В Амурской области в основании автодороги лежат дисперсные грунты элювиально-делювиального и аллювиально-пролювиального генезиса. Подстилают их полускальные грунты (песчаники, аргиллиты и алевролиты юрского, верхнеэоценового и нижнечетвертичного возраста) и скальные грунты (граниты верхнего палеозоя и средней юры). Мерзлые грунты в СГТ встречаются редко. На глубине 8–10 м температура грунтов изменяется от $+3.9$ до -0.8 °С.

Результат апробации региональной модели⁵, как и следовало ожидать, показывает большую систематическую ошибку разного знака по отношению к данным термометрии скважин (табл. 4). Так, на объектах “Н-Бестях” и “Амур” минимальная и максимальная прогнозная температура мерзлых грунтов на глубине 8–15 м занижена на 2.3–3.1 и 0.7–1.7 °С, а на объекте “Ключус” завышена на 2.8–4.7 °С. При такой величине и непредсказуемости ошибок начальная электромагнитная диагностика фона абсолютных значений температуры мерзлых грунтов невозможна без привязки к данным термометрии скважин⁶.

Тем не менее задача тепловой диагностики имеет удовлетворительное решение, если использовать общий для всех методов геофизики подход, а именно, изучать относительную площадную изменчивость в большую или меньшую сторону температуры мерзлых грунтов между опорными точками скважин. Пример результатов такого изучения приведен в табл. 5. Из него видно, что большие ошибки тепловой диагностики по региональной

Таблица 5. Прирост прогнозных оценок разности минимальной и максимальной температуры мерзлых грунтов

| Инженерный объект | k , отн. ед. | | Разница температур, °С | | Межвидовой прирост температуры, °С |
|-------------------|----------------|-------|------------------------|---------------------|------------------------------------|
| | Мин. | Макс. | Термометрия скважин | Региональная модель | |
| “Н-Бестях” | 0.33 | 0.41 | 0.6 | 1.4 | 0.8 |
| “Ключус” | 0.33 | 0.48 | -4.0 | -2.1 | -1.9 |
| “Амур” | 0.48 | 0.61 | 1.6 | 0.8 | -0.8 |

Примечание. Межвидовой прирост означает разницу температур по методу термометрии скважин и методу индукции.

модели не мешают по разнице минимальных и максимальных значений k правильно оценить динамику температурного режима мерзлых грунтов между объектами апробации региональной модели на глубине 8–15 м.

В этой динамике максимальная изменчивость температурного режима наблюдается на втором объекте апробации, т. е. в криолитозоне Северо-Востока Якутии на золоторудном месторождении “Ключус”. Здесь разница минимальных и максимальных значений температур мерзлых грунтов в СГТ на глубине 8–15 м по данным термометрии скважин и метода индукции достигает 4.0 и 2.1 °С, тогда как на других объектах апробации она не выше 0.6–1.6 и 0.8–1.4 °С. И это неудивительно, так как рудные месторождения полезных ископаемых, как правило, отличаются сложным геологическим строением и изменчивыми геокриологическими условиями с неустойчивым температурным режимом мерзлых грунтов.

Таким образом, проведенное исследование региональной модели создает реальное основание для эффективного экономического применения методов георадиолокации и индукции на стадиях опережения буровых работ с целью начальной диагностики теплового поведения мерзлых грунтов на площадках и трассах инженерных сооружений в труднодоступных и малообжитых районах Северо-Востока России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате многолетних натуральных экспериментов, выполненных автором по программам фундаментальных исследований СО РАН, было впервые установлено, что для СГТ криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока характерно существование корреляционной связи темпе-

⁵ Ради сокращения объема вычислений результат апробации получен только для данных метода индукции с использованием минимальных и максимальных значений нормированного параметра k .

⁶ После привязки и ввода температурных поправок ошибки диагностики существенно уменьшаются. Однако и в этих случаях точность вычисления по данным методов георадиолокации и индукции температуры мерзлых грунтов в пределах СГТ с вероятностью 77 % не превышает ± 0.6 °С [Нерадовский, 2014б].

ратуры мерзлых грунтов и параметра амплитудного ослабления высокочастотных моноимпульсных и гармонических электромагнитных полей. Эта связь корректно описывается региональной моделью в виде уравнения логистической функции.

Для науки криософии Земли значимость полученной региональной модели состоит в том, что она представляет частную форму общего закона теплового поведения мерзлых грунтов, проявленную в искусственно создаваемых электрических и упругих полях. Вполне возможно, но это еще предстоит доказать, что этот общий для мерзлых грунтов закон, в свою очередь, есть частное проявление в электромагнитных и сейсмоакустических, а также других, еще не изученных полях более общего закона теплового поведения всех известных на Земле криогенных систем переходного типа с неравновесной термодинамикой между двумя крайними состояниями (мерзлым и талым).

Практическую ценность региональная модель обретает как феноменологический эталон описания по данным методов георадиолокации и индукции упорядоченного пространственно-временного теплового поведения мерзлых грунтов в искусственно создаваемых электромагнитных полях. Экономическая эффективность этой региональной модели достигает максимума при проведении проектно-исследовательских и мониторинговых работ, связанных с необходимостью осуществления начальной диагностики и последующего контроля теплового поведения мерзлых грунтов на участках строительства и эксплуатации площадок и трасс инженерных сооружений. Принимаемые на этих этапах решения должны быть ориентированы на оповещение об обнаруженных тенденциях приближения мерзлых грунтов к критической температуре, за которой начинается быстрый и неуправляемый переход в талое состояние, и незамедлительное оповещение. Такие события, как показали исследования, наступают в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока при температуре выше -1°C .

Автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность заведующему лабораторией инженерной геокриологии ИМЗ СО РАН, профессору, д-ру техн. наук Д.М. Шестернёву за моральную поддержку и помощь в выбранной тематике научных исследований.

Литература

- Акимов А.Т.** Вопросы теории и практики электроразведки мерзлых пород // Тр. ПНИИИС. Т. VI. Геофизические методы исследований при изысканиях в строительстве. М., 1971, с. 6–73.
- Akimov, A.T., 1971. Resistivity surveys in permafrost: Theory and practice, in: Geophysical Methods for Engineering Surveys in Construction (PNIIS Transactions, vol. VI, Moscow, pp. 6–73).
- Владов М.Л.** Введение в георадиолокацию: учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 153 с.
- Vladov, M.L., Starovoitov, A.V., 2005. Introduction into GPR Surveys. A Guide. Moscow University, Moscow, 153 pp. (in Russian)
- ГОСТ 25358-82.** Грунты. Метод полевого определения температуры. М., Изд-во стандартов, 1982, 14 с.
- State Standard, 1982. Working Document GOST 25358-82. Soils. Method of Field Temperature Measurements. Izd. Standartov, Moscow, 14 pp. (in Russian)
- ГОСТ 8.417-2002.** Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. Взамен ГОСТ 8.417-81. М., Изд-во стандартов, 2002, 21 с.
- State Standard, 2002. Working Document GOST 8.417-2002. National System Providing Unified Measurements. Measurement Units. Approved instead of working document GOST 8.417-81. Izd. Standartov, Moscow, 21 pp. (in Russian)
- Задериголова М.М.** Радиоволновой метод в инженерной геологии и геоэкологии / М.М. Задериголова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1998, 320 с.
- Zaderigolova, M.M., 1998. Radiowave Soundings in Engineering Geology and Geoenvironment. Moscow University, Moscow, 320 pp. (in Russian)
- Инструкция по электроразведке.** Л., Недра, 1984, 534 с.
- Frantov, G.S. (Ed.), 1984. Practice of Resistivity Surveys. Nedra, Leningrad, 534 pp. (in Russian)
- Кудрявцев В.А.** Методика мерзлотной съемки / В.А. Кудрявцев, Л.С. Гарагуля, К.А. Кондратьева, Н.Н. Романовский, А.Н. Максимова, А.Б. Чижов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1979, 358 с.
- Kudryavtsev, V.A., Garagulia, L.S., Kondratieva, K.A., Romanovskiy, N.N., Maksimova, A.N., Chizhov, A.B., 1979. Methods for Permafrost Surveys. Moscow University, Moscow, 358 pp. (in Russian)
- Лебедев В.Ф.** Комплекс СЭМЗ. Метод. пособие / В.Ф. Лебедев, В.И. Онущенко, Л.М. Литвинцева. Красноярск, НПО “Сибцветметавтоматика”, 1991, 60 с.
- Lebedev, V.F., Onushchenko, V.I., Litvintseva, L.M., 1991. A System for Medium-Frequency Electromagnetic Soundings (MFEMS). User Guide. Sibsvetmetavtomatika, Krasnoyarsk, 60 pp. (in Russian)
- Мельников В.П., Геннадиник В.Б., Брушков А.В.** Аспекты криософии: криоразнообразия в природе // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 2, с. 3–11.
- Melnikov, V.P., Gennadinik, V.B., Brouchkov, A.V., 2013. Aspects of cryosophy: cryodiversity in nature. Earth's Cryosphere, XVII (2), 3–11. (in Russian)
- Нерадовский Л.Г.** Методическое руководство по изучению многолетнемерзлых пород методом динамической георадиолокации / Л.Г. Нерадовский. М., РАН, 2009, 337 с. (Серия “Избр. тр. Рос. школы по проблемам науки и технологий”: ежегод. изд. МСНТ / Гл. ред. Н.П. Ершов).
- Neradvoskiy, L.G., 2009. GPR Soundings of Permafrost. РАН, Moscow, 337 pp. (Ser. Selected Works, Russ. School for Science and Technology, Ed. Ershov, N.P., MSNT). (in Russian)
- Нерадовский Л.Г.** Оценка теплового состояния криолитозоны России методами электромагнитного зондирования: монография / Л.Г. Нерадовский. М., АНО Изд. дом “Науч. обозрение”, 2014а, 333 с.
- Neradvoskiy, L.G., 2014a. Estimating the Thermal State of Permafrost in Russia by Electromagnetic Soundings. Nauchnoye Obozrenie Publ., Moscow, 333 pp. (in Russian)

Нерадовский Л.Г. Статистика точности оценивания температуры мерзлых грунтов неклассическими методами геоэлектрики // В мире науч. открытий, 2014б, № 4.1 (52), с. 472–493.

Neradovskiy, L.G., 2014b. Accuracy of permafrost temperature estimates by unconventional resistivity methods: Statistical assessment. V Mire Nauchnykh Otkrytiy 4.1 (52), 472–493. (in Russian)

Руководство по применению полупроводниковых терморезисторов для геотермических измерений / В.Т. Балобаев, Б.В. Володько, В.Н. Девяткин, А.И. Левченко, В.Г. Русаков. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1985, 48 с.

Balobaev, V.T., Volodko, B.V., Devyatkin, V.N., Levchenko, A.I., Rusakov, V.G., 1985. Use of Semiconductor Thermistors for Geothermal Measurements. User Guide. Institute of Permafrost, Yakutsk, 48 pp. (in Russian)

Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья / П.А. Соловьев. М., Изд-во АН СССР, 1959, 144 с.

Soloviev, P.A., 1959. Permafrost in the Northern Lena-Amga Interfluvium. Izd. AN SSSR, Moscow, 144 pp. (in Russian)

Способ георадиолокации многолетнемерзлых пород: пат. 2490671 RU, МПК G01V 3/12, G01S1 3/88 / Нерадовский Л.Г.; заяв. Нерадовский Л.Г. № 2011125238/28; заявл. 17.06.2011; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23.

Neradovskiy, L.G., 2013. A method for GPR soundings of permafrost. Patent 2490671 RU, МПК G01V 3/12, G01S1 3/88. Claimed by L.G. Neradovskiy, No. 2011125238/28. Claimed on 17.06.2011; Published on 20.08.2013, Bull. No. 23.

Цытович Н.А. К теории равновесного состояния воды в мерзлых грунтах // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз., 1945, т. IX, № 5–6, с. 493–502.

Tsytovich, N.A., 1945. Theory of equilibrium water phase state in permafrost. Izv. AN SSSR, Ser. Geogr. Geofiz. IX (5–6), 493–502. (in Russian)

Хименков А.Н. Переходные зоны в системе криолитогеоноза // Материалы Междунар. конф. “Экстремальные криосферные явления: фундаментальные и прикладные аспекты”. Пушкино, Пушкинский науч. центр РАН, 2002, с. 39–40.

Khimenkov, A.N., 2002. Transitional zones in permafrost, in: Extreme Cryospheric Phenomena: Theoretical and Applied Aspects, Proc. Intern. Conf., Pushchino, pp. 39–40. (in Russian)

Швецов П.Ф. Общие закономерности возникновения и развития многолетней криолитозоны. Основы геофизиологии / П.Ф. Швецов. М., Изд-во АН СССР, 1959, с. 76–92.

Shvetsov, P.F., 1959. Origin and evolution of permafrost: general laws. Fundamentals of Geocryology. Izd. AN SSSR, Moscow, pp. 76–92. (in Russian)

*Поступила в редакцию
2 июня 2016 г.*