УДК 550.306

Нерадовский Леонид Георгиевич
ФГБУ науки Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения РАН
Россия, Якутск[1]
Старший научный сотрудник
Кандидат технических наук
leoner@mpi.ysn.ru

Пространственно-временная и физическая общность явления термозависимости затухания электромагнитных волн в криолитозоне России

Аннотация. Доказана региональная повторяемость термозависимости коэффициента затухания электромагнитных волн в слое годовых теплооборотов. Это ранее неизвестное природное явление в течение многих лет изучалось в криолитозоне России в освоенных и осваиваемых районах Восточной Сибири и Дальнего Востока на территориях Республики Саха (Якутии), Забайкальского края, Дальнего Востока. Явление представляет собой вероятностно-детерминированный процесс, наблюдаемый в любое время года в природных условиях и на застроенных территориях с разнообразными географо-климатическими, геологическими, гидрокриогеохимическими и инженерно-геокриологическими условиями эксплуатации зданий и сооружений, построенных на многолетнемёрзлых породах. С приемлемой для решения научно-инженерных задач точностью процесс корректно описывается нелинейной математической моделью – уравнением логистической регрессии. Модель рассматривается как эталон теплового поведения криогенных систем Земли и в этом отношении применима в разномасштабных мониторинговых сетях, как инструмент долговременного контроля и прогноза пространственно-временной динамики температурного поля криолитозоны в сфере теплового и механического взаимодействия со зданиями и сооружениями в условиях совместного воздействия климатических и техногенно-антропогенных факторов.

Ключевые слова: Криолитозона; мёрзлые породы и грунты; здания и сооружения; слой годовых теплооборотов; термометрия скважин; методы и сигналы георадиолокации и индукции; явление термозависимости; мониторинг; температура; коэффициент затухания сигналов; математическая модель; корреляция.

[1] 677010, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), ул. Мерзлотная, 36

Введение

Начиная с 2006 г., в лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения РАН в рамках фундаментальных программ СО РАН под руководством д.т.н. Р.В. Чжан, д.т.н. Д.М. Шестернёва выполняются исследования, направленные на поиск, разработку и внедрение прорывных наукоёмких технологий. Одна из таких технологий, которую по нынешним временам принято называть критической, базируется на использовании ранее неизвестного природного явления – термозависимости скорости затухания электромагнитных волн (ЭМВ) в виде сигналов георадиолокации и индукции (далее, термозависимость затухания). Это явление наблюдается в природных условиях и на застроенных территориях в разное время года в слое годовых теплооборотов криолитозоны России. Оно изучено автором статьи в криолитозоне России в освоенных и осваиваемых районах Восточной Сибири и Дальнего Востока на территории Республики Саха (Якутии) и частично, на территориях Забайкальского края и Амурской области.

Цель и задачи исследований

Цель статьи доказать фундаментальность явления термозависимости затухания ЭМВ по категориям физической и пространственно-временной общности. Для достижения цели из множества имеющихся материалов экспериментов собраны, проанализированы и обобщены, лишь те, которые прошли математическую обработку по специальным методикам и представляют явление в многообразии сочетаний природных и антропогенно-техногенных условия строительства и эксплуатации мёрзлых оснований объектов промышленной, гражданской и сельскохозяйственной инфраструктуры освоенных и осваиваемых регионов криолитозоны России.

Постановка и путь решения проблемы

Важнейшим прикладным направлением приоритетных фундаментальных научных исследований, озвученным в указах президента и постановлениях правительства России для исполнения Федеральному агентству по науке и образованию, является поиск, разработка и внедрение критических технологий в части рационального природопользования. Речь идёт о технологиях, сводящих до возможного минимума ущербные риски освоения криолитозоны России и обеспечения её долговременной криогенной безопасности, т.е. сохранения криолитозоны от растепления и полного разрушения. Один из оптимальных и эффективных путей решения этой крупной проблемы не только нашего государства, но и других государств, расположенных частично или полностью в северном полушарии Земли, состоит в применении разработанной автором статьи технологии электромагнитных зондирований (ЭМЗ). Эта технология в составе двух методов неклассической геоэлектрики (георадиолокации, индукции) и метода полупроводниковой термометрии скважин не имеет аналогов ни в России, ни в странах ближнего и дальнего зарубежья. Комплексное использование геолого-геофизических методов одновременно нейтрализует их недостатки, ограничения и усиливает достоинства, преимущества. Тем самым, создаются условия для быстрого, экономичного и экологически чистого всестороннего изучения с поверхности Земли вечно-многолетнемёрзлых пород (далее, мёрзлые), используемых в качестве грунтовых оснований площадок зданий и трасс линейных сооружений. В этом инженерном аспекте обозначенной государственной проблемы интерес представляет сфера теплового и механического взаимодействия мёрзлых грунтов с инженерными сооружениями, сопряжённая по глубине со слоем годовых теплооборотов (СГТ) мощностью 5-50 м.

На первый план на застроенных территориях выступает не уже известное по данным изыскательских работ, неизменяемое строение, состав и, в меньшей степени, свойства мёрзлых грунтов, а пространственно-временная динамика их температурного режима в процессе эксплуатации инженерных сооружений.

В этом целевом предназначении и по физическим предпосылкам технологию ЭМЗ вправе рассматривать, как один из способов волновой электрометрии, позволяющий с приемлемой точностью количественно оценивать средние значения температуры мёрзлых грунтов в СГТ и на его нижней границе [7]. Далеко не все согласны с названием этого способа, но прецеденты этому есть в отечественной практике термометрии. Достаточно сослаться на способ струнной термометрии, использующий датчики «ПТС-60». Их термозависимое свойство – частота колебаний стальной струны, запаянной в герметичный корпус. Такие термометры давно рекомендованы ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева к производственному употреблению и успешно работают в составе контрольно-измерительной аппаратуры с целью оценки теплового состояния оснований гидротехнических сооружений, построенных в криолитозоне России. Заметим, что производственное применение способа струнной термометрии, несмотря на невысокую точность (0,5 ^{o}C), узаконено стандартом ОАО РАО «ЕЭС России» [11].

В настоящее время, после долгого забвения, появился интерес к проблематике производственной количественной оценки температуры мёрзлых грунтов методами геофизики. Пример этому эффективное использование одного из высокоразрешающих методов геоэлектрики в криолитозоне Красноярского края [2].

Материалы, методы и методики исследований

Фактические материалы экспериментов получены двумя методами ЭМЗ. Это – метод моноимпульсного высокочастотного георадиолокационного зондирования (далее, ГРЛЗ) и метод дипольного дистанционного среднечастотного индуктивного зондирования (далее, ДДСИЗ). Зондирования этими методами выполнялись в разные сезоны года с разной измерительной техникой отечественного и зарубежного изготовления. В её числе, георадары «Тритон», «ОКО-М», «ОКО-2», «ЛОЗА-В», «SIR-2000» а также уникальная аппаратура индукции со стрелочной индикацией «СЭМЗ». В ходе многолетних экспериментов, начатых в 1986 г., накоплен фактический материал чуть ли не по 1000 изыскательских скважин, пробуренных на сотнях объектах проектно-изыскательских работ в освоенных и осваиваемых районах Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Принимая во внимание стохастическую природу ЭМВ неоднородных анизотропных криогенных систем Земли, представленных мёрзлыми грунтами, на стадии полевых работ применялась разработанная автором статьи методика многоразового измерения сигналов ГРЛЗ и ДДСИЗ с изменением положения и ориентации приёмно-передающих антенн в окрестности точек скважин полупроводниковой термометрии [5]. На стадии математической обработки выполнялась аппроксимация степенными функциями, поля мгновенного амплитуд ансамблей случайных реализаций сигналов ГРЛЗ и ДДСИЗ, собранных вокруг скважин. Средний показатель скорости затухания амплитуд обобщённых сигналов до заданной глубины – коэффициент затухания (k) – принимался по показателю степенной функции. При такой методике точность оценки k не опускалась ниже (10-15) %. Такой уровень точности с давних пор считается номинальным в геологии при геофизических поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. Поэтому нет веских оснований повышать точность определения k, применительно к решению задач инженерной геологии, мерзлотоведения и грунтоведения, как того требуют некоторые геофизики. На стадии построения математических моделей – уравнений регрессии геолого-геофизических характеристик – значения k сравнивались с двумя характеристиками теплового состояния мёрзлых грунтов,

которые постоянно используются проектировщиками при расчётах несущей способности фундаментов зданий и сооружений.

Первая характеристика (t_e) – среднее значение температуры, вычисленное по всему СГТ или ниже сезонноталого слоя на интервале установки свайных фундаментов, работающих за счёт сил бокового сцепления с мёрзлыми грунтами. Вторая характеристика (t_z) – значение температуры в СГТ на глубине установки свайных фундаментов. Чаще всего, в производственных условиях t_z оценивается на глубине 10 м. При этом точность оценки температуры в скважинах полупроводниковыми датчиками (терморезисторами) из-за действия ряда неконтролируемых факторов редко бывает выше ±0,1 ºС, несмотря на градуировку в лабораторных условиях с точностью порядка ±0,01 ºС.

Скрытые закономерности явления термозависимости затухания ЭМВ мегагерцового диапазона (сигналов ГРЛЗ, ДДСИЗ) изучалась по классической методике корреляционного и регрессионного анализа с использованием лицензионной программы “Stadia”, руководствуясь рекомендациями её создателя А.П. Кулаичева [3]. Одна из его рекомендаций предостерегала от использования на поисковых стадиях изучения явлений множества предикторных (независимых) переменных. В конкретном случае исследования были ограничены двумя информационно значимыми переменными: характеристиками t_z и t_e.

Результаты исследований

В табл. 1 представлен список объектов экспериментов, приготовленных надлежащим образом для статистического анализа с указанием числа параметрических определений на скважинах полупроводниковой термометрии парных значений $k \rightarrow t_z$ и $k \rightarrow t_e$, использованных для изучения явления термозависимости затухания ЭМВ по категориям физической, пространственной и временной общности. Под категорией физической общности понимается повторяемость явления, как в сигналах ГРЛЗ, так и в сигналах ДДСИЗ. Пространственная общность подразумевает повторяемость явления в разных местах криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока с неповторимым разнообразием случайного сочетания природных (геологических, криогенных и др.) и антропогенно-техногенных условий эксплуатации мёрзлых грунтов. Временная общность сводится к устойчивой повторяемости явления в СГТ в межгодовой сезонной динамике температурного режима мёрзлых грунтов, а также в разные годы проведения экспериментов.

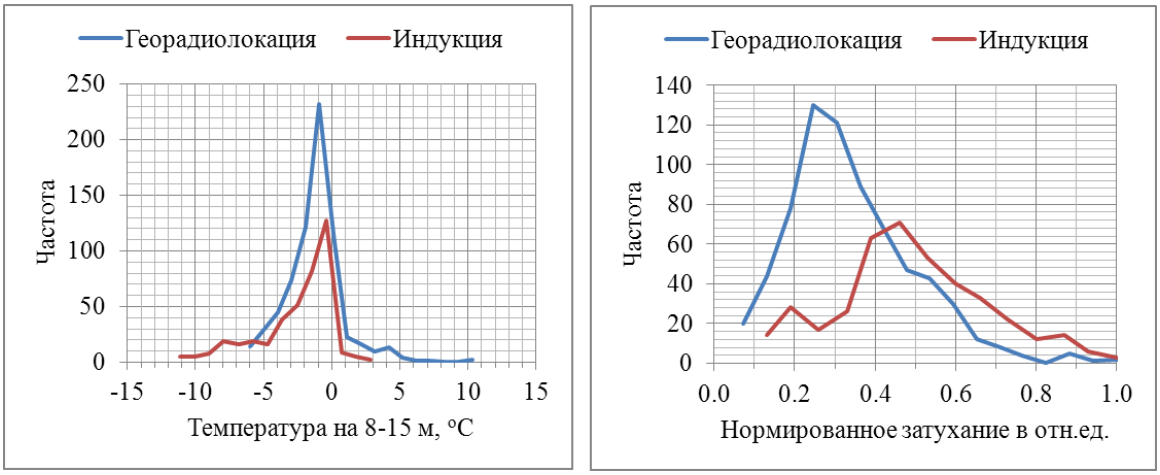
Таблица 1

Список объектов экспериментов в Восточной Сибири и Дальнем Востоке

М	Номер объекта	Район, название объекта, время проведения эксперимента	t на глубине 8-15 м (°С)
ГРЛЗ (N=702)	1	г. Мирный, зима 2007 г.	-6,2 ÷ +2,19
	2	г. Якутск, застройка квартала 84, весна 2008 г.	-2,4 ÷ -0,2
	3	г. Нерюнгри, весна 1988-1990 гг.	+1,3 ÷ +6,5
	3	г. Нерюнгри, осень 1988-1990 гг.	-3,2 ÷ +1,3
	4	г. Якутск. Застройка “Зелёный Луг”, 1977 г.	-2,4 ÷ +1,1
	5	г. Якутск, стадион “Юность”, лето 2007 г.	-4,3 ÷ -0,3
	6	г. Якутск, Сергелляхское шоссе, весна 2008 г.	-5,8 ÷ 0,5
	7	г. Якутск. Мониторинг ИМЗ СО РАН, 2009-2010 гг.	-6,5 ÷ +10
	8	г. Якутск. Мониторинг ЯПСЭ, 2001-2003 гг.	-4,4 ÷ +7,6
	9	Станция “Кюргеллях”, осень 1990 г.	-5,4 ÷ -0,3
	10	Станции “Правая Лена” - Нижний Бестях, лето 1995	-3,8 ÷ 0,0
	11	г.	-4,0 ÷ +10,8
	12	г. Якутск, ТЭЦ, лето 2005 г.	-4,4 ÷ +0,5
		п. Зырянка, зима 1987 г.	
ДДСИЗ (N=402)	1	п. Черский. Дом быта, лето 1989 г.	-6,2 ÷ -3,8
	2	Автодорога “АЯМ”, лето 2006 г.	-4,0 ÷ -1,1
	3	Ж/д “Томмот-Якутск”, осень 2011 г.	-4,5 ÷ +0,2
	4	Месторождение “Кючус”, лето 2008 г.	-8,8 ÷ -4,7
	5	“АЯМ” и ж/д “Томмот-Якутск”, осень 2011 г.*	-0,93 ÷ 0,0
	6	Автодорога “Вилюй”, осень 2012 г.	-3,8 ÷ -0,53
	7	Автодорога “Амур”, осень 2013 г.**	-1,2 ÷ +3,4
	8	г. Якутск, застройка квартала 84, весна 2008 г.	-6,0 ÷ +2,5
	9	Станция ж/д “Правая Лена”- Ст. Н-Бестях, лето	-3,8 ÷ +1,2
	10	1995 г.	-9,6 ÷ -1,1
	11	Жилой посёлок “Биллях”, зима 2000 г.	-11,7 ÷ -4,4
	12	Тиксинская АЭС, осень-зима 1989-1990 гг.	-0,3 ÷ 0,0
		Станция ж/д Н-Бестях, осень 2011 г.	

*Примечание: * – специальные исследования маловлажных и высокотемпературных мёрзлых песчаных отложений на Лено-Амгинском междуречье Центрально-Якутской равнины; ** – Забайкальский край и Амурская область; 3) М – метод исследования; 4) N – количество опытов. Составлено автором.*

Выборочная совокупность объектов экспериментов, представленная в табл. 1, репрезентативна, как по объёму, так и по спектру изменчивости температуры мёрзлых грунтов в СГТ на глубине бурения изыскательских скважин термометрии (8-15 м). На этой глубине, судя по максимальной частоте встречаемости значений температур, явление термозависимости затухания сигналов ЭМЗ изучено преимущественно в температурном диапазоне от 0 до -5 °С (рис. 1, а). Этот сравнительно неширокий диапазон охватывает практически весь спектр изменчивости температурного режима мёрзлых оснований зданий и сооружений (МОЗС) в центральной и южной части сплошной и островной криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока. В меньше степени явление изучено в северных частях этого огромного региона России по причине его труднодоступности. Тем не менее, полученные в этом регионе результаты усиливают объективную картину термозависимости затухания сигналов ЭМЗ в области низких температур до -11 °С.



а б

Рис. 1. *Графики вероятностного распределения значений температуры мёрзлых грунтов (а) и коэффициента затухания сигналов ЭМЗ (б) в СГТ криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока. Составлено автором.*

Сборка материалов эксперимента в единое целое обнаружило важную особенность. Она показана на рис. 1, б. Суть её в том, что при прочих равных условиях сигналы ДДСИЗ с частотой 1,125 МГц затухают в СГТ почти в два раза быстрее сигналов ГРЛЗ с центральной частотой спектра излучения-приёма 30-300 МГц. Отчасти этот неожиданный факт объясняется разным масштабным фактором. Под ним понимается разные объёмы изучения мёрзлых грунтов. У метода ГРЛЗ мёрзлые грунты изучаются в окрестности точки зондирования в радиусе 3-5 м, а у метода ДДСИЗ – в радиусе 30-50 м. Соответственно этому происходит большее геометрическое расхождение фронта индуктивной волны со снижением плотности потока её энергии по глубине. При этом 10-ти кратные потери энергии за счёт масштабного фактора до некоторой степени компенсируются за счёт более низкой частоты индуктивной волны.

Теперь обратимся к результатам изучения термозависимости затухания сигналов ЭМЗ. В масштабе криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока наблюдается сильная изменчивость значений коэффициентов затухания сигналов ГРЛЗ (рис. 2, а), ДДСИЗ (рис. 2, б) и температуры мёрзлых грунтов. В этой пространственно-временной динамике выражается чувствительность термозависимости скорости затухания сигналов ЭМЗ к изменению индивидуальных географо-климатических, геологических, гидрогеологических, криогидрогеохимических и наконец, инженерно-геокриологических условий строительства и эксплуатации МОЗС. Совокупность всех этих условий, определяет на текущий момент времени проведения экспериментов термодинамику мёрзлых грунтов в СГТ или, проще говоря, количество тепловой энергии в мёрзлых грунтах. Её изменчивость есть та главная корневая причина, которая изменяет фазовый состав мёрзлых грунтов, увеличивая или уменьшая содержание незамёрзшей воды вместе с изменением её структуры и свойств. И далее, по цепочке, вызывает согласованное на разных иерархических уровнях изменение геолого-геофизических характеристик термодинамики, в частности, температуры и коэффициента затухания сигналов ЭМЗ. Эти, казалось бы, совершенно разные физические характеристики с разных сторон, разными способами и техническими средствами несут с разной точностью и достоверностью информацию о тепловом состоянии мёрзлых грунтов. В этом их информационная равноправность и научно-производственная значимость, хотя с точки зрения метрологии они неравноправны. Однако это не препятствует в благоприятных условиях оценивать термодинамику мёрзлых грунтов путём привязки геолого-геофизических

характеристик к температуре. Исключение составляют базовые характеристики грунтов: минералогический и гранулометрический состав, влажность, засолённость и др. [1].

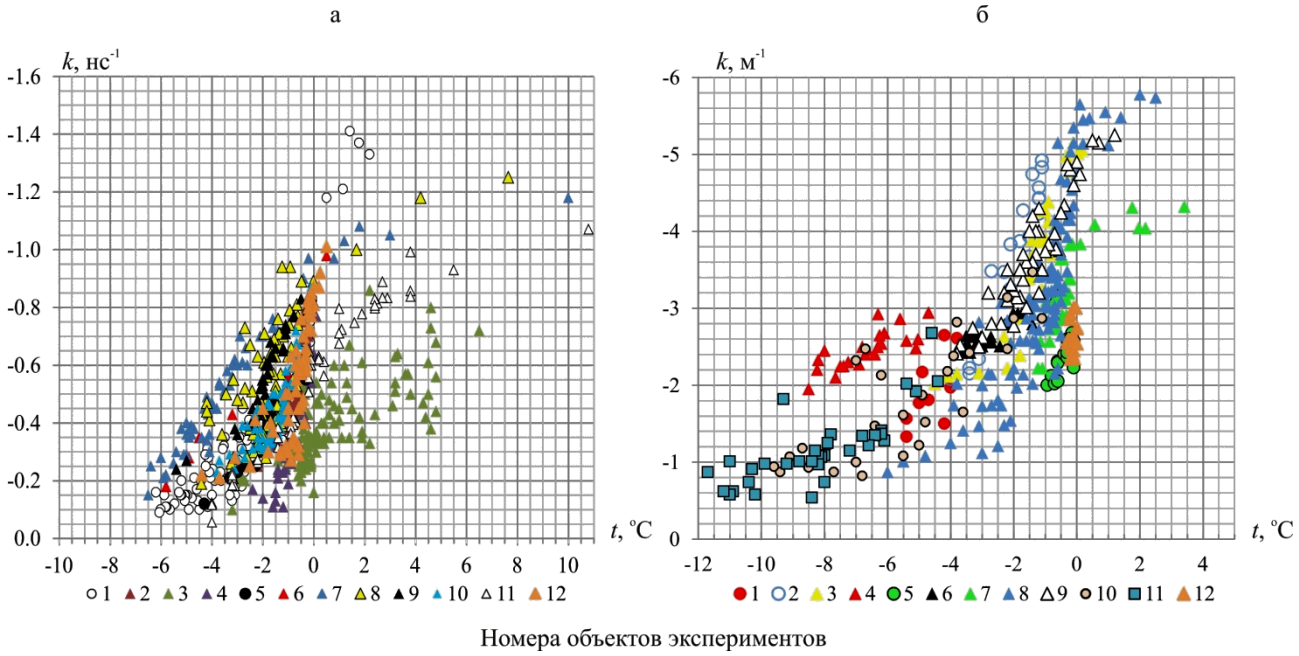


Рис. 2. *Сводные точечные диаграммы экспериментальных данных: а - метод ГРЛЗ; б - метод ДДСИЗ. Названия номеров объектов экспериментов в табл. 1*
Составлено автором

При всём случайном сочетании многообразия условий строительства и эксплуатации МОЗС наблюдается общая закономерная картина, наиболее ясно выраженная в термозависимости коэффициента затухания (*k*) сигналов ДДСИЗ (рис. 2, б). Главная черта закономерности, заключающая в себе физическую и пространственно-временную общность, состоит в том, что повышение температуры мёрзлых грунтов сопровождается нелинейным ростом *k* сигналов ЭМЗ. Причём, уровень детерминации этой зависимости на фоне действия других мерзлотно-грунтовых факторов, например, льдистости и засолённости, не опускается ниже 60 % и чаще всего, составляет (70-80) %.

В более явственном и понятном виде общность явления по всем категориям предстаёт после приведения к одному относительному уровню скорости затухания ЭМВ путём нормировки на максимальные значения *k* (рис. 3, а), а затем полиномиальной регуляризации преобразованных данных, подавляющей действие случайных помех (рис.3, б). Нормировка *k* не только подтверждает большую скорость затухание сигналов ДДСИЗ, о чём сказано выше, но и обнаруживает дифференциацию этой разницы, в зависимости от температуры. При нуле градусов разница составляет 1,4÷1,5, а при -6 °С увеличивается до 2,5÷3,6. Более того, операция нормировки визуально усиливает эффект разброса значений *k*, максимум которого наблюдается при переходе мёрзлых грунтов в талое состояние. Этот факт говорит о том, что по мере раздельного или совместного климатического или антропогенно-техногенного нагрева мёрзлых грунтов связь температуры и скорости затухания ЭМВ в СГТ снижается и становится очень слабой и практически незаметной в области положительных температур. Вследствие этого точность термометрии методами ЭМЗ уменьшается при увеличении температуры мёрзлых грунтов и становится недопустимо низкой при изучении талых грунтов, что и ожидалось.

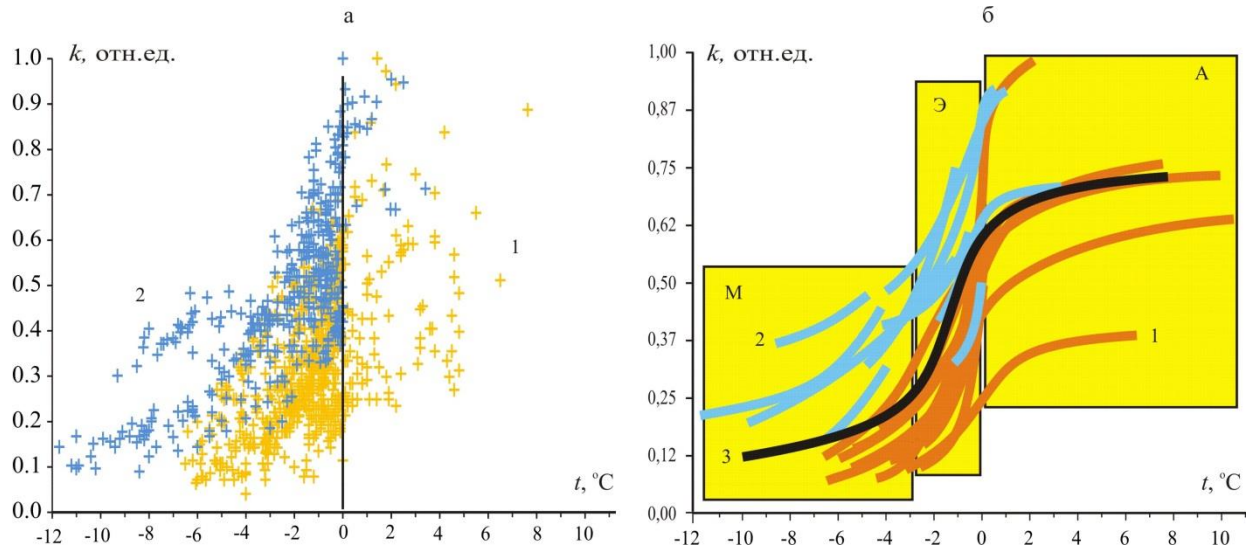


Рис. 3. *Сводные графики физической и пространственно-временной общности в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока термозависимости затухания ЭМВ в СГТ до глубины 8-15 м в исходном виде (а) и полиномиальной аппроксимации (б): 1-метод ГРЛЗ; 2 - метод ДДСИЗ; 3 – региональное обобщение в виде графика уравнения логистической регрессии. Типовые участки термозависимости: М - монотонный; Э - экстремальный; А – асимптотический*
Составлено автором.

Объектные фрагменты термозависимости затухания сигналов ГРЛЗ и ДДСИЗ, описанные полиномами 2 порядка, занимают разное положение на плоскости фактических данных, как по координате *k*, так и по координате *t* (рис. 3, а), выражая в сглаженном и виде частные закономерности, соответствующие индивидуальным условиям проведения экспериментов по множеству природных и техногенно-антропогенных условий. Ни один из графиков частных закономерностей не в состоянии проследить в конкретных условиях проведения эксперимента общий закон региональной изменчивости *k* в широком диапазоне температур от -12 до +10 °С. И только в совокупном виде после обобщения фрагментарных зависимостей действие этого закона в пределах криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока, проявляется в нелинейной форме в виде графика уравнения логистической регрессии (рис. 3, б). В чём его научная ценность и прагматическая значимость?

Со стороны науки график логистической регрессии есть графический образ региональной модели, устанавливающей, ранее неизвестные в области петрофизики криолитозоны, корректные вероятностно-детерминированные отношения двух характеристик термодинамики мёрзлых грунтов: классической – температуры и неклассической – коэффициента затухания в СГТ электромагнитных волн мегагерцового диапазона. Математический образ модели описывается аналитически уравнением:

1.1. $$t = [a_0 + a_1/(1 + a_2 \cdot \exp(a_3 \cdot k))] + \delta$$

где, *t* – средняя температура в слое годовых теплооборотов и фиксированное значение температуры на нижней границе этого слоя в °К; a_0-a_3 – эмпирические коэффициенты, зависящие от места, времени и условий изучения температуры мёрзлых грунтов; *k* – показатель скорости затухания ЭМВ (коэффициент затухания) в $нс^{-1}$, $м^{-1}$ или в отн.ед; δ – случайная ошибка.

Исследования автора статьи доказали, что закон логистической регрессии корректно связывает вероятностно-детерминистическими отношениями температуру и с другими

геофизическими характеристиками, изученных в криолитозоне России в лабораторных и натурных условиях на образцах и массивах мёрзлых пород и грунтов [6, 7]. Это – неволновые базовые (электропроводность, диэлектрическая проницаемость) и не базовые (показатели электрохимической активности и др.) электрические и волновые сейсмоакустические характеристики (скорости распространения упругих продольных волн). Такая общность выводит явление термозависимости скорости затухания электромагнитных волн, представленных сигналами ГРЛЗ, ДДСИЗ мегагерцового диапазона частот, из регионального масштаба Восточной Сибири и Дальнего Востока на всю территорию криолитозоны России (национальный масштаб) и, возможно, криолитозоны всей Земли (планетарный масштаб), хотя последнее предположение ещё предстоит доказать. В этом отношении логистическую модель правомерно рассматривать, как одну из теоретических моделей криогенных систем Земли, описывающую в СГТ по геофизическим характеристикам общие закономерности теплового поведения открытых неравновесных термодинамических систем переходного типа, находящихся между двумя крайними состояниями: мёрзлом – талом. Остаётся надеяться, что эта модель, выражающая физическую, пространственную и временную общность явления термозависимости геофизических характеристик, в частности, скорости затухания сигналов ЭМЗ, займёт надлежащее место в новой науке криософии Земли, основы которой в настоящее время плодотворно разрабатываются академиком В.П. Мельниковым и другими учёными мерзлотоведами [4].

Производственная значимость общей логистической модели состоит в своевременном обнаружении и оповещении опасных тенденций – приближения процесса растепления мёрзлых оснований зданий и сооружений к критическому состоянию, за которым начинается практически неуправляемый и необратимый процесс перехода мёрзлых грунтов в талое состояние. Опасные тенденции легко обнаружить в разномасштабных сетях долговременного геолого-геофизического температурного мониторинга по началу перехода значений k из монотонной области в область экстремальную (рис. 3, б). К сожалению, таких сетей долговременного комплексного мониторинга в России пока нет. Есть надежда, что они появятся при совместном использовании методов наземной электромагнитной и полупроводниковой термометрии скважин, дополняющих друг друга, как по точности, так и по полноте и достоверности изучения температуры мёрзлых грунтов. Здесь уместно привести обобщённые данные по точности методов ЭМЗ, полученные на конкретных объектах строительства и эксплуатации площадных и линейных сооружений в освоенных и осваиваемых районах криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока на территории Якутии, Забайкальского края и Амурской области. Вероятностная структура ошибок вычисления характеристик температурного поля в СГТ (t_z и t_e) по частным моделям термозависимости разных объектов экспериментов, приведена в табл. 2. В ней выделены несколько условных категорий точности с неравномерной шкалой. В категорию высокой точности, близкой к термометрии скважин, входят ошибки не превышающие 0,2 ^oC. Их доля в общем объёме ошибок составляет: у ГРЛЗ – 32 %, у ДДСИЗ – 40 %. Доля неприемлемых для практики аномальных ошибок из категории очень низкой точности (выше 1 ^oC) для этих методов соответственно составляет 10 и 7 %.

Преобладание в 3-4 раза маленьких ошибок над большими ошибками есть серьёзный аргумент в пользу производственного применения методов ЭМЗ для количественной оценки температуры мёрзлых грунтов. Причём, как показывают последние исследования автора статьи, доминирование минимальных средних ошибок на уровне 0,3 ^oC наблюдается в интервале температур -(0,5÷3,5) ^oC. За его границами начинается медленный рост ошибок до 1 ^oC в сторону понижения температуры до -12 ^oC и стремительный рост ошибок до 3 ^oC в сторону повышения температуры до +9 ^oC. Эта региональная закономерность ограничивает применение методов ЭМЗ в природных условиях и на застроенных территориях сплошной и

островной криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока с умеренным (-(1÷4) ºС) и высоким температурным режимом мёрзлых грунтов, не превышающим -0,5 ºС. Заметим, что во всех случаях разница фактически наблюдаемых и теоретически предсказуемых ошибок электромагнитной термометрии мёрзлых грунтов не превышает 10 %.

Таблица 2

Ошибки вычисления по данным ЭМЗ температуры на глубине 8-15 м

Категория точности	Интервал разброса ошибок, ºС	Вероятность, %	
		индукция	георадиолокация
Очень высокая	0,0-0,1	20	18
Высокая	0,0-0,2	40	32
Средняя	0,0-0,3	54	46
Умеренная	0,0-0,6	78	72
Низкая	0,6-1,0	13	17
Очень низкая	более 1,0	7	10

Примечание: составлено автором

Заключение

Обобщение материалов многочисленных экспериментов, собранных за несколько десятилетий, доказало фундаментальность явления термозависимости затухания не только ЭМВ в СГТ, но и иных геофизических характеристик мёрзлых грунтов по трём категориям общности: физической; пространственной; временной. Явление корректно описывается в масштабе не только криолитозоны Восточной Сибири и Дальнего Востока, но и всей России общей моделью в виде уравнения логистической регрессии. Эта, впервые созданная, модель, по всей вероятности выражает общий закон 3-х стадийного теплового поведения открытых неравновесных в СГТ термодинамических систем Земли переходного типа, представленных одной их криогенных систем – мёрзлыми грунтами.

Всё вместе взятое создаёт физические предпосылки для применения в строительной индустрии методов ГРЛЗ и ДДСИЗ по двум направлениям. Первое направление – проектно-изыскательские работы. Второе направление – разномасштабный долговременный мониторинг динамики теплового состояния мёрзлых оснований, как отдельно взятых зданий и сооружений, так и их совокупности в населённых пунктах и промышленных зонах. Ожидается, что в этом направлении термометрические возможности методов ГРЛЗ и ДДСИЗ проявят максимальную эффективность в совместном использовании с методом полупроводниковой термометрии скважин. Главная цель при такой методике работ – своевременное обнаружение и оповещение персонала эксплуатируемых объектов промышленности и социально-гражданского назначения о приближении теплового состояния их мёрзлых оснований к опасной черте – критическому состоянию, за которым начинается неуправляемый лавинообразный процесс фазового перехода льда в воду с полной потерей механической прочности мёрзлых грунтов. Об этом не раз говорил академик В.И. Осипов [9, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурьянов, И.Е. Инженерная криолитология: прочность вечномёрзлых грунтов / И.Е. Гурьянов; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. – Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2009. – 139 с.
2. Емельянов, Е.И. Определение температуры многолетнемерзлых пород в слое годовых теплооборотов методом высокоразрешающего электрического зондирования / Е.И. Емельянов, В.М. Бондаренко В.М. // Промышленное и гражданское строительство, 2003, №11. – С. 18-21.
3. Кулаичев, А.П. Методы и средства комплексного анализа данных / А.П. Кулаичев. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. – 512 с.
4. Мельников, В.П. Аспекты криософии: криоразнообразие в природе / В.П. Мельников, В.Б. Геннадиник, А.В. Брушков // Криосфера Земли. – 2013. – Т. XVII, № 2. – С. 3–11.
5. Нерадовский, Л.Г. Методическое руководство по изучению многолетнемёрзлых пород методом динамической георадиолокации / Л.Г. Нерадовский. – М.: Изд-во РАН, 2009. – 337 с. – (Серия "Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий": ежегодное издание МСНТ / гл. ред. Н. П. Ершов).
6. Нерадовский, Л.Г. Теоретическое обоснование и экспериментальное доказательство связи температуры с геофизическими характеристиками мёрзлых пород и грунтов. Итоги диссертационных исследований в инженерной геологии, мерзлотоведении и грунтоведении: Монография / Л.Г. Нерадовский. – Saint-Louis, MO: Publishing House «Science & Innovation Center», 2013. – 118 с.
7. Нерадовский, Л.Г. Оценка теплового состояния криолитозоны России методами электромагнитного зондирования: монография / Л.Г. Нерадовский; Рос. акад. наук. Сиб. отд-ние, Федер. гос. бюдж. учреждение науки "Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН". – М.: АНО Изд. Дом «Науч. обозрение», 2014. – 333 с.
8. Нерадовский, Л.Г. Статистика точности оценивания температуры мёрзлых грунтов неклассическими методами геоэлектрики / Л.Г. Нерадовский // В мире научных открытий, №4.1 (52), 2014. – С. 472-493.
9. Осипов, В.И. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях / В.И. Осипов // Всемирная конференция по природным катастрофам: Итоги, стратегия, перспективы (Иокогама, Япония, 22-27 мая 1994 г.). – М., ВИНИТИ, 1994, вып. 11, С. 3–21.
10. Осипов, В.И. Природные опасности: Мониторинг и оповещение / В.И. Осипов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2013, №3, с. 209-215.
11. СТО 17330282.27.140.004-2008. Контрольно-измерительные системы и аппаратура гидротехнических сооружений ГЭС. Условия создания. Нормы и требования. – М. : ОАО «ЕЭС РОССИИ», 2008. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: http://www.nchkz.ru/lib/54/54041/index.htm. – Загл. с экрана.

Рецензент: Курилко Александр Сардокович, заведующий лабораторией горной теплофизики, д.т.н. Республика Саха (Якутия), Якутск. Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской Академии Наук.

Leonid Neradovskii
Melnikov Permafrost Institute SB RAS, senior research associate
Russia, Yakutsk
leoner@mpi.ysn.ru

Spatial, time and physical generality of the phenomenon of thermal dependence of electromagnetic wave attenuation in the Russian permafrost zone

Abstract: The regional repeatability of the thermal dependence of electromagnetic wave attenuation coefficient within the depth of annual temperature fluctuation has been proved. This previously unknown natural phenomenon was studied during many years in the Russian permafrost zone in the built areas and areas of new development in East Siberia and the Far East on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia), Zabaykalsky Krai, and the Far East. This phenomenon is a probabilistic-deterministic process observed at any time of the year in natural and built environments with diverse geographic-climatic, geological, hydrocryogeochemical and engineering-geocryological conditions for operation of the buildings and structures constructed on permafrost. With acceptable accuracy for scientific-engineering problems, the process is correctly described by a non-linear mathematical model – a logistic regression equation. The model is considered as a standard of the thermal behavior of the Earth's cryogenic systems and, in this respect, is applicable in diverse-scale monitoring networks as a tool for long-term control and prediction of spatio-temporal dynamics of the permafrost temperature field in the sphere of thermal and mechanical interaction with buildings and structures under the combined impacts of climatic and technogenic-anthropogenic factors.

Keywords: permafrost; frozen soils and rocks; buildings and structures; layer of annual temperature fluctuations; borehole thermometry; methods and signals of ground penetrating radar and induction; thermal dependence phenomenon; monitoring; temperature; signal attenuation coefficient; mathematical model; correlation.

REFERENCES

1. Gur'yanov, I.E. Inzhenernaya kriolitologiya: prochnost' vechnomerzlykh gruntov / I.E. Gur'yanov; Ros. akad. nauk, Sib. otd-nie, In-t merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova. – Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo “Geo”, 2009. – 139 s.
2. Emel'yanov, E.I. Opredelenie temperatury mnogoletnemerzlykh porod v sloe godovykh teplooborotov metodom vysokorazreshayushchego elektricheskogo zondirovaniya / E.I. Emel'yanov, V.M. Bondarenko V.M. // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo, 2003, №11. – S. 18-21.
3. Kulaichev, A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh / A.P. Kulaichev. 4-e izd., pererab. i dop. – M.: Izd-vo FORUM: INFRA-M, 2006. – 512 s.
4. Mel'nikov, V.P. Aspekty kriosofii: krioraznoobrazie v prirode / V.P. Mel'nikov, V.B. Gennadinik, A.V. Brushkov // Kriosfera Zemli. – 2013. – T. XVII, № 2. – S. 3–11.
5. Neradovskiy, L.G. Metodicheskoe rukovodstvo po izucheniyu mnogoletnemerzlykh porod metodom dinamicheskoy georadiolokatsii / L.G. Neradovskiy. – M.: Izd-vo RAN, 2009. – 337 s. – (Seriya “Izbrannye trudy Rossiyskoy shkoly po problemam nauki i tekhnologiy”: ezhegodnoe izdanie MSNT / gl. red. N. P. Ershov).
6. Neradovskiy, L.G. Teoreticheskoe obosnovanie i eksperimental'noe dokazatel'stvo svyazi temperatury s geofizicheskimi kharakteristikami merzlykh porod i gruntov. Itogi dissertatsionnykh issledovaniy v inzhenernoy geologii, merzlotovedenii i gruntovedenii: Monografiya / L.G. Neradovskiy. – Saint-Louis, MO: Publishing House «Science & Innovation Center», 2013. – 118 s.
7. Neradovskiy, L.G. Otsenka teplovogo sostoyaniya kriolitozony Rossii metodami elektromagnitnogo zondirovaniya: monografiya / L.G. Neradovskiy; Ros. akad. nauk. Sib. otd-nie, Feder. gos. byudzh. uchrezhdenie nauki “In-t merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN”. – M.: ANO Izd. Dom «Nauch. obozrenie», 2014. – 333 s.
8. Neradovskiy, L.G. Statistika tochnosti otsenivaniya temperatury merzlykh gruntov neklassicheskimi metodami geoelektriki / L.G. Neradovskiy // V mire nauchnykh otkrytiy, №4.1 (52), 2014. – S. 472-493.
9. Osipov, V.I. Problemy bezopasnosti pri chrezvychaynykh situatsiyakh / V.I. Osipov // Vsemirnaya konferentsiya po prirodnym katastrofam: Itogi, strategiya, perspektivy (Iokogama, Yaponiya, 22-27 maya 1994 g.). – M., VINITI, 1994, vyp. 11, S. 3–21.
10. Osipov, V.I. Prirodnye opasnosti: Monitoring i opoveshchenie / V.I. Osipov // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya, 2013, №3, s. 209-215.
11. STO 17330282.27.140.004-2008. Kontrol'no-izmeritel'nye sistemy i apparatura gidrotekhnicheskikh sooruzheniy GES. Usloviya sozdaniya. Normy i trebovaniya. – M. : OAO «EES ROSSII», 2008. – Elektron. tekstovye dan. – Rezhim dostupa: http://www.nchkz.ru/lib/54/54041/index.htm. – Zagl. s ekrana.