

УДК 550.8.012 + 504.056

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИИ ТЕПЛОвого МОНИТОРИНГА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К БЕЗОПАСНОСТИ ОСВОЕННЫХ И ОСВАИВАЕМЫХ РАЙОНОВ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ

Нерадовский Л.Г.

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (ИМЗ СО РАН),
Якутск, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru*

Рассматриваются вопросы промышленной, гражданской и экологической безопасности, имеющие прямое отношение к принятой стратегии долговременного и устойчивого экономического развития России на урбанизированных территориях криолитозоны Сибири и Дальнего Востока. Воплощение этой стратегии в жизнь вряд ли возможно без решения важной научной концепции и крупной народно-хозяйственной проблемы. Суть проблемы состоит в поиске и разработке наукоёмких инновационных технологий обеспечивающих в локальном и региональном масштабе ресурсосберегающую и экологически чистую диагностику, контроль и прогноз теплового состояния многолетнемерзлых пород, используемых в качестве оснований объектов строительства и эксплуатации зданий и сооружений. Эксперименты, проведённые в криолитозоне Якутии и Забайкалья, научно обосновали решения, позволяющие выйти на технологии, объединяющие преимущества метода термометрии скважин и «неклассических» методов геофизики. В этом подходе просматривается путь организации долговременных сетей теплового мониторинга криолитозоны, что поможет на ранних стадиях обнаруживать запуск процессов климатического или техногенного растепления мерзлых оснований зданий и сооружений и тем самым, не допускать или минимизировать риски возникновения аварий и катастроф.

Ключевые слова: методология, технология, методы геофизики, метод термометрии скважин, массивы мёрзлых грунтов, температура, затухание электрических полей

SOME METHODOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ISSUES OF TEMPERATURE MONITORING WITH REGARD TO SAFETY OF EXISTING AND NEW INFRASTRUCTURE IN THE RUSSIAN PERMAFROST ZONE

Neradovsky L.G.

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru

The article discusses the issues of industrial, civil and ecological safety pertinent to the adopted strategy of long-term and sustainable economic development of Russia in the urban areas of the Siberian and Far Eastern permafrost zone. Implementation of this strategy will be hardly possible without solving the important scientific concept and major economic problem. The problem is to pursue and develop science-intensive innovation technologies that provide resource-saving and environmentally friendly diagnostics, control and prediction of the thermal state of permafrost in built-up areas. Experiments carried out in Yakutia and Trans-Baikal have provided a scientific foundation to solutions that can lead to technologies combining the advantages of borehole thermometry and «non-classic» geophysical methods. This approach is seen as means for organization of long-term permafrost thermal monitoring networks that will allow early detection of climate or anthropogenically driven warming of foundation soils and thus prevent or alleviate risks of disaster.

Keywords: methodology, technology, geophysical methods, borehole thermometry, frozen ground, temperature, electromagnetic field attenuation

Президент и правительство России связывают с освоением природных богатств криолитозоны¹ Сибири и Дальнего Востока надежды устойчивого и долговременного развития экономики, что чрезвычайно важно в условиях протекающих и назревающих кризисов мировых экономических систем. Однако освоение этих труднодоступных территорий вместе с шельфом приморских низменностей арктического побережья изначально сталкивается с проблемой бережного отношения к массивам многолетнемерзлых пород, которые используются или

будут использоваться в качестве грунтовых оснований зданий и сооружений разного назначения. Эти массивы нужно сохранять в течение всего срока эксплуатации инженерных сооружений, который составляет для объектов гражданского назначения порядка 50 лет, а для объектов промышленно-стратегического назначения (ГЭС, АЭС и др.) – не менее 100 лет. Опыт освоения Западной Сибири в местах расположения месторождений нефти и газа показывает, что сохранить криолитозону в надлежащем виде, сведя к минимуму тепловое на неё воздействие, не удаётся даже в течение первого десятка лет.

Давно сформулированная концепция общей государственной безопасности [1], в основу которой был положен приоритет

¹ Верхняя часть литосферы с отрицательной температурой горных пород и присутствием в них порового, сегрегационного льда и переохлаждённых растворов минерализованной воды (криопэггов). По разным оценкам криолитозона занимает 60–70 % территорий России.

прогнозирования и предупреждения аварийных ситуаций и катастроф [9], так и осталась нереализованной. По данным Е.С. Мельникова и др. [4] такие крупные бизнес структуры, как ОАО «Газпром», АК «Транснефть», АК «Лукойл» не выполнили обещаний в выполнении принятой концепции и не довели их до методических и технологических решений. Неопределённая ситуация в планомерном оценивании теплового состояния криолитозоны сложилась и в МЧС России. Например, в обзорной с многообещающим названием статье подведомственного МЧС Федерального центра науки и высоких технологий нет даже упоминания такого рода задач, которые необходимо решать при региональной диагностики надёжности зданий и сооружений мобильным аппаратурно-техническим комплексом [8]. Такое же положение и в педагогической деятельности. В одном из последних учебных изданий в мониторинговом списке объектов наблюдения нет объектов тепловой диагностики криолитозоны [12, с. 290–292].

Почему так происходит? Причин тут множество и самых разных. Не входя в их рассмотрение, что составляет предмет отдельной статьи, отметим лишь одну причину. Это – несостоятельность планомерного оценивания теплового состояния урбанизированных территорий криолитозоны методом термометрии скважин. Метод этот не только дорог и не везде применим на застроенных территориях, но вдобавок нарушает экологию окружающей среды и дестабилизирует в процессе бурения множества скважин естественное тепловое состояние верхней части криолитозоны, находящейся в сфере механического взаимодействия с инженерными сооружениями до глубины 10–20 м и редко, до глубины 50–100 м.

Цель и задачи исследования

С позиции теории криогенных систем необходимо было сформулировать – и в этом состояла цель исследования – методологические положения, объединяющие температуру и характеристики геофизических полей, как информационно равнозначные и корреляционно согласованные физические величины, зависящие при прочих равных условиях от теплового состояния массивов мёрзлых грунтов (ММГ), являющихся основаниями фундаментов инженерных сооружений. Тем самым, создавались предпосылки научного обоснования оптимальных (с точки зрения информационно-экономических показателей) технологи-

ческих решений, касающиеся количественной оценки в слое годовых теплооборотов (СГТ) климатических и техногенно-антропогенных изменений теплового состояния ММГ и их прогнозирования на краткосрочную или долгосрочную перспективу.

Материалы и методы исследований

Простые технологические решения были найдены на пути объединения преимуществ метода термометрии скважин (ТС) и методов геофизики криолитозоны. В этом объединении преимуществом метода ТС является высокая точность (не ниже $\pm 0,1^\circ\text{C}$) оценки температуры ММГ на разной глубине. Преимущество у методов геофизики много. Это – высокая производительность, сравнительно низкая себестоимость, мобильность, возможность работать в любом месте застроенных территорий, высокая объёмная информативность. Всеми этими преимуществами обладают «неклассические» методы геофизики. В полной мере это относится к методу импульсного высокочастотного георадиолокационного зондирования (ГРЛЗ) и в меньшей степени к индукционному методу дипольного дистанционного среднечастотного зондирования (ДДСЭМЗ) и методу вертикального электрического зондирования на постоянном токе в модификации вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП).

Фактурологическим материалом для статьи послужили результаты экспериментов, проведённых по изучению влияния температуры на затухание сигналов георадиолокации, индуктивной и кондуктивной электротометрии в освоенных районах криолитозоны Якутии и Забайкалья. В Якутии натурные эксперименты были выполнены методами ГРЛЗ и ДДСЭМЗ Л.Г. Нерадовским под руководством Р.В. Чжан и Д.М. Шестернёва в областях сплошной и островной криолитозоны в рамках программ и проектов фундаментальных исследований СО РАН:

1) 2003–2006 гг. Программа 24.4. «Криогенные процессы в естественных и искусственных средах. Методика мониторинга, моделирование и прогноз состояния криосферы». Проект 24.4.3. «Исследование взаимосвязи устойчивости природно-технических систем с кинетикой теплофизических и физико-механических свойств пород криолитозоны»;

2) 2007–2009 гг. Программа 7.10.2. «Состояние, строение и изменения криосферы: криогенез и его воздействие на природные и техногенные геосистемы». Проект 7.10.2.6. «Обеспечение надёжности оснований инженерных сооружений в криолитозоне на основе совершенствования современных методов изучения мерзлых толщ»;

3) 2010–2012 гг. Программа VII.63.2. «Природные и техногенные системы в криосфере Земли и их взаимодействие». Проект VII.63.2.6. «Тепловое и механическое взаимодействие инженерных сооружений с мерзлыми грунтами».

В Забайкалье многочисленные и всесторонние лабораторные и натурные эксперименты были выполнены В.В. Оленченко методом ВЭЗ-ВП под руководством Д.М. Шестернёва в области островной мерзлоты. Для этого была создана оригинальная лабораторная установка и модифицирована существующая методика полевых измерений вызванных электрических потенциалов на ранней стадии возбуждения ММГ.

**Результатов исследований
и их обсуждение**

Результаты экспериментальных исследований методами ГРЛЗ и ДДСЭМЗ в освоенных районах сплошной и островной криолитозоны Якутии обобщены и представлены в монографии [7]. Результаты исследований методом ВЭЗ-ВП опубликованы в коллективной монографии [11]. Обсуждение результатов выполняется в научном (методологическом) и производственном (технологическом) аспектах.

В *методологическом аспекте* природные криогенные системы и методы наземной электрометрии, как и все методы геофизики криолитозоны, объединяет фундаментальный закон единства в многообразии свойств объектов материального мира. Из этого закона исходят все остальные законы и принципы², дающие право сформулировать три постулата: (1) постулат информационной равноправности; (2) постулат иерархической причинно-следственной взаимообусловленности³; (3) постулат корреляционной согласованности. Постулаты по необходимости связывают в разных парных и многомерных корреляционных комбинациях температуру с рассматриваемыми электрическими характеристиками в единое множество физических величин⁴. В нем все характеристики, зависят от термодинамики и её производной – фазового состава открытых неравновесных криогенных систем. Исключение составляют базис-

ные характеристики ММГ⁵, зависящие от возрастных и генетических особенностей их образования. Выражаясь яснее, под неравновесной термодинамикой открытых криогенных систем следует понимать аккумулярованную и перераспределяемую в пространстве и времени внешнюю (солнечную) или внутреннюю (техногенную) тепловую энергию.

Элементы стохастического поведения присущи всем природным криогенным системам [10] и передаются геофизическим полям, которые их возбуждают. Такая полигенетическая особенность даёт возможность описывать сложнейшее взаимодействие криогенных систем и геофизических полей набором вероятностно-статистических характеристик. В инженерном мерзловедении ими предстают нормативные инженерно-геологические элементы ММГ, а в геофизике криолитозоны – нормативные показатели геофизических свойств ММГ. В рассматриваемом случае нормативные ИГЭ это – среднегодовые температуры в СГТ, а нормативные показатели – соответствующие СГТ средние значения коэффициентов скорости затухания геофизических полей⁶. Для нахождения устойчивых к случайным вариациям полей средних оценок коэффициентов специально разработана для анизотропных и неоднородных мёрзлых массивов методика [6]. Её оригиналь-

² Например, закон взаимности и порядка, закон соотношения меры детерминации и стохастичности, принцип Ле Шателье – К. Брауна и др.

³ Взаимообусловленность геолого-геофизических характеристик не всегда очевидна, но она существует в природе в силу действия закона сохранения энергии (первого начала термодинамики). Частное доказательство этому находится в фундаментальной работе Ю.М. Мисника [5, с. 14–15], в которой описан механизм взаимного влияния температуры и поглощения энергии сверхвысокочастотных электромагнитных волн, происходящий при диэлектрическом нагреве ММГ. Теоретически это явление должно сопровождать, хотя и в существенно меньшей степени диэлектрический и индукционный нагрев ММГ в процессе кратковременного его возбуждения методами ГРЛЗ и ДДСЭМЗ, но экспериментальных доказательств этому в научно-технической литературе нет.

⁴ Такое множество, и это уже есть достижение в инженерной геологии, было предложено в 1996 г. В.А. Королёвым в новой и пока последней инженерно-геологической классификации с подразделением свойств массивов пород и грунтов на подклассы, типы и группы (ёмкостные, транспортные, критические) [2].

⁵ В работе И.Е. Гурьянова [3] языком математической логики доказывается, что влажность (льдистость), гранулометрический состав и несущая способность грунтов в области локального взаимодействия со зданиями и сооружениями, полностью описывают прочностное состояние дисперсных (песчано-глинистых) ММГ в системе координат базисных функций. По-видимому, к базисным свойствам дисперсных, полускальных и скальных массивов следует отнести состав и плотность минеральной матрицы.

⁶ Изучены 2 типа импульсных полей и 1 тип индуктивного поля. Первый тип импульсного поля представлен высокочастотными электромагнитными волнами, которые изучены методом ГРЛЗ с помощью георадаров. Использовались георадары с антеннами, настроенными на центральную частоту излучения зондирующего моноимпульса 30–300 МГц. Длительность моноимпульса порядка 5–10 нс. Второй тип импульсного поля представлен переходной характеристикой ранней стадии процесса поляризации ММГ, которая изучена методом ВЭЗ-ВП с помощью специально сконструированной аппаратуры С-014, С-038, «Чара-3». Возбуждение ММГ производится прямоугольными импульсами длительностью 15–20 мс. Индуктивное поле изучено методом ДДСЭМЗ с использованием аппаратуры «СЭМЗ», работающей на одной из 4-х частот (0,281, 0,562, 1,125, 2,250 МГц). Возбуждение поля производится гармоническим источником – вертикальным магнитным диполем с измерением реакции ММГ – напряжённости вертикальной составляющей вектора магнитной индукции.

ность состоит в многоразовых измерениях сигналов в окрестности точек геолого-геофизической сети наблюдений с изменения на поверхности Земли положения точек возбуждения ММГ. Заметим, что методика разовых измерений характеристик геофизических полей не даёт устойчивых интерпретационных решений и применима лишь в редких случаях изучения простых построению, однородных по состоянию и неизменных по свойствам ММГ.

Обобщение результатов исследований, выполненных Л.Н. Нерадовским в Якутии и В.В. Оленченко в Забайкалье, приводит к региональной модели дисперсных ММГ, устанавливающей качественную-количественные отношения между температурой и нормированными коэффициентами скорости затухания электрических полей в СГТ до глубины 10–20 м. Графики модели изображены на рис. 1.

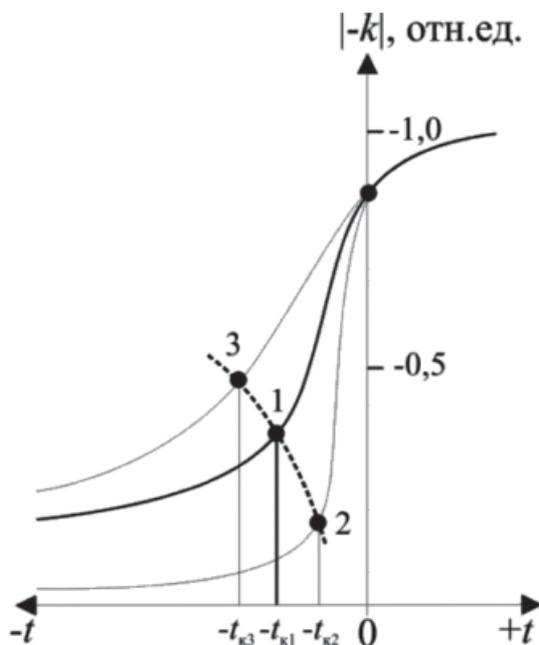


Рис. 1. Графики теоретической модели зависимости от температуры коэффициента затухания электрических полей в освоенных районах криолитозоны Якутии и Забайкалья: 1 – незасоленные дисперсные ММГ; 2 – незасоленные песчаные ММГ; 3 – засоленные песчано-глинистые ММГ

Теоретическая модель отображает главные черты закономерности нелинейного затухания электрических полей на постоянном и переменном токе, установленные в температурном интервале $\pm 15^\circ\text{C}$ на лабораторных моделях и ММГ в разных инженерно-геокриологических условиях регионов Якутии и Забайкалья. Аналогич-

ные черты наблюдались⁷ во 2-й половине прошлого века при проведении многочисленных экспериментов в лабораторных и натуральных условиях⁸. Поэтому в силу действия закона аналогии или подобия есть основание перейти на более высокий уровень обобщения результатов экспериментов, расширяя границы применимости частной теоретической региональной модели на всю криолитозону России.

Графический образ теоретической модели (см. рис. 1) корректно описывается уравнением логистической функции, что особенно важно при решении задач математического прогноза теплового состояния ММГ. В библиотеке программы «Stadia» аналитическая запись функции в приложении к Microsoft Excel имеет следующий вид:

$$k = (a_0 + a_1) / (1 + a_2 \cdot \exp(a_3 \cdot t)),$$

где k – значение нормированного коэффициента скорости затухания электромагнитных полей и постоянного электрического поля вызванной поляризации (обратный параметр приведённой скорости нарастания переходной характеристики $1/S_k$); t – значение среднегодовой температуры в СГТ и на его нижней границе, залегающей на глубине 10–20 м (в градусах Кельвина); a_0 – a_3 – эмпирические коэффициенты, зависящие от места, времени проведения мониторинга и индивидуальных инженерно-геокриологических условий строительства или эксплуатации инженерных сооружений.

Для вычисления температуры в логистическом уравнении модели достаточно переставить местами переменные k и t . Таким образом, графический образ теоретической модели и её аналитическое уравнение предоставляют возможность качественно и количественно диагностировать по пло-

⁷ Черты монотонности в мёрзлом и талом состоянии и черта экстремальности в области интенсивных фазовых переходов около нуля градусов наблюдались на образцах и массивах в единичных случаях для электрического поля постоянного тока (классический метод ВЭЗ) и во множестве случаев для сейсмоакустических и ультразвуковых полей. При этом температурная зависимость геофизических характеристик была изучена для образцов пород и грунтов разного генезиса, состава, структурно-текстурного строения и свойств. Что касается ММГ, то спектр их изученности охватывает самые разные климатические, геологические, гидрогеологические и инженерно-геокриологические условия строительства и эксплуатации зданий и сооружений в освоенных районах криолитозоны России.

⁸ И потому ценных с точки зрения независимости экспертных оценок объективности, достоверности и согласованности результатов экспериментов, проведённых в лабораторных и натуральных условиях.

щади урбанизированных территорий, контролировать во времени и прогнозировать пространственно-временную динамику теплового состояния мёрзлых оснований фундаментов зданий и сооружений, построенных и эксплуатируемых в криолитозоне России. В этом состоит квинтэссенция методологии научного обоснования технологии геофизического мониторинга в комплексе с технологией бурения и термометрии скважин.

Технологический аспект результатов исследований очевиден и заключается в производственном использовании теоретической модели, как эталона скорости роста коэффициентов затухания электрических и иных полей в процессе климатического и (или) техногенного процесса растепления ММГ, вовлеченных в процесс промышленной эксплуатации. С этим эталоном следует сравнивать частные математические модели температурной зависимости, которые будут строиться при проведении температурного мониторинга на урбанизированных территориях. Частными моделями могут быть модели отдельно взятых аварийных зданий или группы зданий в пределах квартальной застройки, нефтепромысла и т.д. или модели, охватывающие большую площадь селитебных и промышленных зон. В любом случае для построения моделей требуется привязка данных электрических зондирований к данным бурения и термометрии опорных скважин, вскрывающих криолитозону до глубины залегания нижней границы СГТ. Места бурения точек опорных скважин следует располагать по редкой и неравномерной сети в соответствии с картой инженерно-геологического районирования условий строительства и эксплуатации зданий и сооружений на урбанизированных территориях криолитозоны. Количество скважин определяется из расчёта: по 1–3 скважине на каждый ключевой участок местности или проблемный участок застройки. Промежутки площади между точками опорных скважин заполняются в заданном масштабе и детальности точками сети геофизических наблюдений. В окрестности каждой точки выполняются многократные электрические зондирования методами ГРЛЗ, ДДСЭМЗ и ВЭЗ-ВП с определением средних показателей коэффициента затухания полей в СГТ до глубины 10–20 м. После сопоставления обработанных и проинтерпретированных данных зондирований с данными термометрии скважин строятся прямые и обратные частные математические модели. Прямые

модели устанавливают условные⁹ причинно-следственные зависимости показателей затухания с температурой, а обратные модели – формально математические зависимости температуры и показателей затухания. На начальной стадии мониторинга прямые модели диагностируют характер площадной изменчивости температурного режима ММГ в СГТ и на его нижней границе. Обратные модели дают возможность вычислить средние показатели среднегодовой температуры в зоне работы боковой поверхности фундаментов за счёт сил смерзания (ниже сезонноталого слоя) и на глубине их установки, сопряжённой с нижней границей СГТ. Средний показатель точности вычисления по обратным моделям¹⁰ средних значений этих, важных для проектирования и строительства, характеристик температурного поля достигает максимума у метода ГРЛЗ. В большинстве случаев средняя точность не выходит за границы $\pm 0,3$ °С. Этот уровень точности близок к точности термометрии скважин полупроводниковыми терморезисторными датчиками. У метода ДДСЭМЗ уровень точности снижается до $\pm(0,7-1,0)$ °С, но это не мешает его использовать в мониторинге теплового состояния криолитозоны, где ценностью является не абсолютная точность вычисления температуры, а мера относительного её изменения по площади и во времени. Точность вычисления температуры методом ВЭЗ-ВП неизвестна, так как в работе [11] этих данных нет.

Завершается начальный этап мониторинга построением карт среднегодовых температур в СГТ и на его нижней границе по данным термометрии скважин и данным наземной электротометрии. Эти карты позволяют увидеть картину площадной изменчивости уровня и направленности изолиний температурного поля, что даёт понять его топологию с визуальной глазомерной или цифровой фильтрацией фоновых и аномальных составляющих. Сделать это нетрудно разными программами компьютерной обработки, например, широко распространённой программой «Surfer-8».

Дальнейшие этапы мониторинга: контроль температурного поля во времени и его прогнозирование составляют нераз-

⁹ С точки зрения соблюдения структурно-иерархического порядка передачи информации о тепловом состоянии ММГ при его возбуждении электрическими полями.

¹⁰ Они могут отличаться от общей теоретической модели и адекватно описываться разными линейными и нелинейными математическими функциями.

рывный и длительный технологический процесс. Этот процесс незаметно переходит от повторения в заданном режиме времени геолого-геофизических наблюдений в точках опорных скважин термометрии и в рядовых точках электрических зондирований к завершающему этапу – сравнительному анализу серии карт температурного поля с прогнозированием тенденций его изменения во времени и пространстве. Только благодаря этим картам, которых до сих пор нет в России, появится возможность решения важной научно-прикладной проблемы: раздельного оценивания вклада климатических

и антропогенно-техногенных факторов на изменение теплового состояния криолитозоны в локальном и региональном масштабе. В решении этой проблемы ключевую роль должна сыграть общая теоретическая модель (см. рис. 1), как геофизический эталон процесса растепления ММГ.

Наконец, обратим внимание на использование морфологических признаков электрических полей при проведении мониторинговых исследований в криолитозоне России. Их эффективность станет понятной благодаря иллюстрации на примерах рис. 1 и 2.

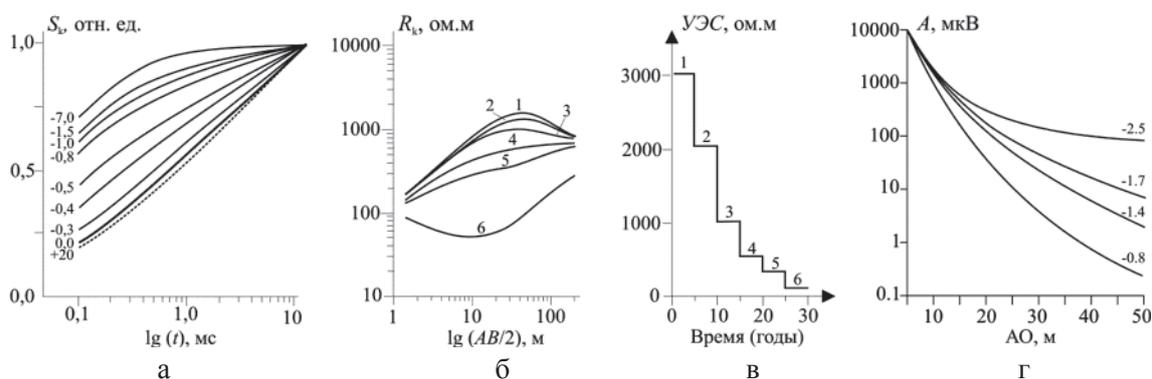


Рис. 2. Иллюстрация морфометрических возможностей методов электрометрии в мониторинге теплового состояния СГТ криолитозоны:

а – графики переходных характеристик метода ВЭЗ-ВП [11];

б – теоретические кривые метода ВЭЗ; в – дискретный график УЭС модели геоэлектрического разреза; г – графики затухания характеристики H_z в зависимости от разноса метода ДЭСЭМЗ и температуры ММГ (пояснения в тексте)

О чём говорит рис. 1? О том, что экстремальный рост коэффициентов затухания электрических полей начинается вблизи точек с критическими значениями температур, выше которых начинается интенсивный лавинообразный процесс фазовых превращений льда в воду. Если его вовремя не заметить и не остановить путём искусственного охлаждения, то ММГ перейдут сначала в неустойчивое тепловое состояние с высокими отрицательными температурами, а затем в талое состояние со всеми вытекающими катастрофическими последствиями. В своевременной фиксации процесса растепления всех генетически-возрастных типов ММГ, приближающихся к критическому состоянию, и заключается смысл гражданской, промышленно-энергетической и транспортной безопасности России в освоенных и осваиваемых районах криолитозоны России. Заметим, что положение точек с критическими температурами на графиках теоретической модели неодинаково. В общем случае положение критических точек зависит от множества

факторов, но существует правило, согласно которого повышение дисперсности и засоленности ММГ повышает фоновый уровень коэффициентов затухания и смещает точки в сторону более низких температур. Таким образом, в ходе мониторинговых наблюдений на площадках отдельных зданий и сооружений при неизменном строении, составе и базовых свойствах, можно вместе с динамикой температурного режима оценить и динамику засоленности ММГ. Другая сторона мониторинговой морфометрии заключается в сравнительном анализе кривых геофизического зондирования ММГ. Такая простейшая форма мониторинга оказывается не менее эффективной остальных форм мониторинга. Она, хотя и не даёт количественных оценок о тепловом состоянии ММГ, но и не требует привязки к данным бурения и термометрии скважин. Посмотрим на рис. 2, где изображены графики разных характеристик методов электрических зондирований.

На рис. 2, а видим графики переходных характеристик по параметру приведённой

скорости поляризации S_k , на интервале временных задержек 0,1–10 мс. Графики получены В.В. Оленченко лабораторной установкой метода ВЭЗ-ВП на дисперсной модели ММГ – образце песчаной грунтовой смести в интервале в зависимости от температуры при заданных значениях грансоостава (фракция 0,10–0,25 мм), влажности (0,20 д.ед.) и засолённости (концентрация порового раствора 0,40 г/л). Чувствительность S_k к изменению температуры не остаётся постоянной. В ранней стадии процесса вызванной поляризации на времени задержки 0,1 мс значения S_k изменяются в 5 раз. По мере приближения к поздней стадии, мера изменчивости S_k нелинейно уменьшается и на времени задержки 10 мс, становится равной нулю. Переход песчаной модели ММГ Забайкалья из мёрзлого состояния с температурой $-7,0^\circ\text{C}$ в опасную зону интенсивных фазовых переходов, а затем в талое состояние, фиксируется по двум признакам: (1) трансформации графиков нелинейной переходной характеристики в графики линейной переходной характеристики; (2) снижению S_k ниже уровня 0,5 отн. ед.

Теперь представим ситуацию, в которой мониторинговой моделью ММГ является толща мёрзлых четвертичных отложений. Эти образования широко развиты на континентальных и приморских равнинах криолитозоны Сибири и Дальнего Востока и, в частности, в Якутии в пределах обширной Центрально-Якутской низменности. В большинстве случаев на таких урбанизированных территориях криолитозоны строительство и эксплуатация зданий и сооружений ведётся по первому принципу, т.е. с сохранением массивов многолетне-мёрзлых пород, в которые заглубляются так называемые, «висячие» свайные фундаменты¹¹ на глубину 10–12, реже, 15–20 м.

Следуя модельному сценарию, зададим на середину летнего периода времени геоэлектрический разрез Центрально-Якутской низменности тремя слоями: (1) сезонноталый слой супесей мощностью 1,0 м и УЭС = 100 омметра; (2) нерасчленённый по составу и литологии слой мёрзлых песчано-глинистых и гравийно-галечниковых отложений мощностью 20 м и УЭС = 3000 омметра; (3) мёрзлые осадочные породы коренного основания

с УЭС = 600 омметра, залегающие на глубине 21,0 м.

Теоретические кривые ВЭЗ¹² такой модели, построенные программой А.А. Бобачёва «PI2Win», показаны на рис. 2, б в динамике 30-летнего растепления толщ мёрзлых четвертичных отложений, например, под зданием с большим выделением тепла. В этой динамике отчётливо отражается последовательный характер изменения величины УЭС (рис. 2, в) второго слоя геоэлектрического разреза и соответствующие этой величине изменения формы кривых ВЭЗ. В начальный этап мониторинга слой сохранил естественное значение УЭС = 3000 омметра, что нашло выражение в отчётливом максимуме кривой ВЭЗ с кажущимся электрическим сопротивлением $R_k = 1600$ омметра на значении полуразноса питающей линии $AB/2 = 40$ м.

Начиная с пятого года мониторинга, процесс растепления начал постепенно проникать в мёрзлую толщу четвертичных отложений, что немедленно отразилось на снижении максимума R_k кривых ВЭЗ. На 15 году мониторинга развивающийся процесс растепления мёрзлой толщ сопровождается исчезновением максимума на кривых ВЭЗ. Ещё через 10 лет мёрзлая толща полностью переходит в талое состояние и под зданием формируется чаша оттаивания до глубины 21,5 м. Об этом событии свидетельствует появление на кривой ВЭЗ минимума со значением $R_k = 50$ омметра на $AB/2 = 10$ м.

Методика сравнительной морфологии оказывается эффективной и при использовании метода ДДСЭМЗ. Покажем это на примере температурного мониторинга протяжённого линейного сооружения стратегического назначения (рис. 2, г). Это – участок, строившейся в криолитозоне Центральной и Южной Якутии, трассы ж/д «Томмот-Кердём-Нижний Бестях» протяжённостью 420 км. Представленные (см. рис. 2, г) графики затухания амплитуды напряжённости индуктивного магнитного поля (вертикальной составляющей вектора магнитной индукции H_z), получены на частоте 1,125 МГц при удалении приёмной антенны от точки стояния передающей антенны на расстояние $AO = 50$ м. Графики показывают, что скорость монотонного спада значений H_z в сильной степени зависит

¹¹ Фундаменты, не опирающиеся на скальное основание, состоящее из крепких монолитных пород осадочного, интрузивного или метаморфического происхождения.

¹² Цифры на рис. 2, б и рис. 2, в – порядковые номера этапов мониторинга в течение 30 лет с интервалом через 5 лет: 1 – 0–5 лет, 2 – 5–10 лет, ..., 6 – 25–30 лет.

от значений среднегодовой температуры ММГ в СГТ на глубине 10 м. Видно, что в местах трассы, где происходит повышение температуры мёрзлого основания трассы ж/д на глубине 10 м, наблюдается повышение скорости снижения значений H_z . Чем более растеплено мёрзлое основание строительными работами, тем быстрее затухает по глубине индуктивное магнитное поле. Мера этого затухания, как и сигналов георадиолокации, оценивается эмпирическим коэффициентом затухания по показателю теоретической степенной функции. Так, например, при температуре мёрзлого основания $-2,5$ и $-0,8^\circ\text{C}$ коэффициенты затухания соответственно равны $-2,35$ и $-4,13$ отн. ед.

Таким образом, сравнительный анализ формы кривых электрического зондирования, каким-либо одним из изученных методов «неклассической» геофизики оказывается эффективным инструментом, а в ряде случаев единственным инструментом качественной оценки относительной изменчивости теплового состояния сложных по изменчивости строения и состава ММГ. Заметим, что при комплексном использовании методов ГРЛЗ, ДДСЭМЗ, ВЭЗ-ВП надёжность этого оценивания увеличится в три раза. Однако за это надо платить увеличением стоимости мониторинговых исследований.

Заключение

Промышленная, гражданская и экологическая безопасность России в освоенных и осваиваемых районах криолитозоны Западно-Восточной Сибири и Дальнего Востока неразрывно связана с сохранением массивов многолетнемёрзлых пород, используемых в качестве грунтовых оснований фундаментов зданий и сооружений различного назначения. В процессе эксплуатации неизбежно возникают процессы, направленные на растепление мёрзлых оснований инженерных сооружений, поэтому возникает необходимость мобильной, производительной и недорогой ресурсосберегающей и неразрушающей диагностики, контроля и прогноза их теплового состояния в течение не менее 50–100 лет. Решение такой наукоёмкой крупной народно-хозяйственной проблемы возможно путём объединения преимуществ широко распространённого метода термометрии скважин и «неклассических» методов геоэлектрики. Такое объединение научно обосновано с единых методологических позиций теории криогенных систем и геофизических полей и доведено

до уровня экспериментально апробированных технологических решений. Главным результатом таких решений становятся карты текущего и прогнозного температурного поля во времени и пространстве. С помощью этих карт, которых до сих пор нет ни в России, ни в ближнем и дальнем зарубежье, появится возможность решить важную научно-прикладную проблему. Суть проблемы состоит в необходимости отдельного оценивания вкладов климатических и антропогенно-техногенных факторов на изменение естественного теплового состояния криолитозоны в локальном и региональном масштабе. В решении этой проблемы ключевую роль должна сыграть общая теоретическая модель температурной зависимости характеристик изученных методами ГРЛЗ, ДДСЭМЗ, ВЭЗ-ВП электрических полей. С позиции неравновесной термодинамики фазовых переходов льда и воды, происходящих в природных криогенных системах, эта модель рассматривается, как феноменологический эталон реакции систем в СГТ на возбуждение источниками тепловых полей и искусственных электрических полей на постоянном и переменном токе. Общая модель важна ещё и тем, что даёт необходимые ориентиры для продолжения научных исследований в части изучения температурной зависимости характеристики сейсмоакустических и других геофизических полей. Новая технология геолого-геофизического мониторинга теплового состояния урбанизированных территорий криолитозоны, разработанная автором статьи в лаборатории инженерной геокриологии ИМЗ СО РАН по материалам оригинальных экспериментов в сплошной и островной криолитозоне Якутии, не является панацеей. Это всего лишь один из путей оптимального решения важной научной концепции и крупной народно-хозяйственной проблемы многоаспектной криогенной безопасности. Без этого трудно представить долговременное устойчивое развитие и наращивание потенциала экономики России с сохранением жизни гражданского населения, обслуживающего персонала фабрик, заводов, нефтепромыслов и др. объектов промышленности, а также экологии окружающей среды в самом широком смысле. Заметим, что ни в России, ни в ближнем и дальнем зарубежье аналогов предложенной технологии нет. Автор будет весьма благодарен тем, кто не только аргументированно опровергнет его мнение, но и укажет источники публикации информации

о подобных технологиях. Кроме того, автор надеется, что затронутая проблема криогенной безопасности России хоть в какой-то мере привлечёт внимание властей регионов, руководителей МЧС России и городских муниципалитетов и, конечно же, специалистов геокриологов, геофизиков, менеджеров проектно-исследовательских и строительных организаций.

Список литературы

1. Государственная научно-техническая программа «Безопасность». – М.: ВИНТИ, 1993. – т.1. – 242 с.
2. Грунтоведение / Трофимов В.Т., Королёв В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С.; под ред. В.Т. Трофимова. – 6-е изд., переработ. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.
3. Гурьянов И.Е. Инженерная криолитология: прочность вечномёрзлых грунтов; Сиб. отд-ние, Рос. акад. наук, Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. – Новосибирск: Изд-во Гео, 2009. – 139 с.
4. Мельников Е.С. Аэрокосмическое зондирование и геоинформационные технологии в системе обеспечения безопасности природно-технических систем Севера Западной Сибири / Е.С. Мельников, А.Л. Ревзон, А.В. Садов, Н.Н. Хренов // Криосфера Земли. – 2004. – т. XVIII, № 1. – С. 84–90.
5. Мисник Ю.М. Основы разупрочнения мёрзлых пород СВЧ-полями. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1982. – 212 с.
6. Нерадовский Л.Г. Методическое руководство по изучению многолетнемёрзлых пород методом динамической георадиолокации. – М.: Изд-во РАН, 2009. – 337 с. – (Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий: ежегод. изд. МСНТ / гл. ред. Н.П. Ершов).
7. Нерадовский Л.Г. Температурная зависимость сигналов георадиолокации в освоенных районах криолитозоны Якутии; отв. ред. Г.П. Кузьмин; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. – Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2011. – 166 с.
8. Нигметов Г.М. Применение мобильного диагностического комплекса для любых объектов в различных природно-климатических условиях / Г.М. Нигметов, М.Ю. Прошляков, Д.И. Папелков // Технологии гражданской безопасности. – 2004. – № 2. – С. 38–46.
9. Осипов В.И. Всемирная конференция по природным катастрофам: Итоги, стратегия, перспективы (Йокогама, Япония, 22-27 мая 1994 г.) // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – М.: ВИНТИ, 1994. – Вып. 11. – С. 3–21.
10. Хименков А.Н. Очерки вероятностной геокриологии / А.Н. Хименков, А.В. Брушков, А.Н. Власов, Д.Б. Волков-Богородский. – М.: ВИНТИ РАН, 2008. – № 925. – 386 с.
11. Шестернёв Д.М. Исследование криолитозоны методом РСВП / Д.М. Шестернёв, А.П. Карасёв, В.В. Оленченко. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – 238 с.
12. Экологическая диагностика: учеб. пособие / В.В. Клоев, В.В. Зуев, И.И. Ипполитов и др.; под общ. ред. В.В. Клоева. – М.: ИД «Спектр», 2011. – 384 с.: ил. – (Диагностика безопасности).