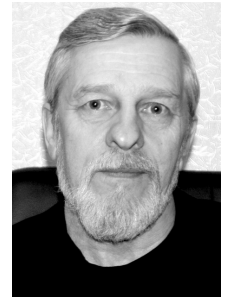


Технология изучения мерзлых грунтов криолитозоны России по затуханию электромагнитных полей

Л. Г. Нерадовский,
д. т. н., старший научный сотрудник,
Институт мерзлотоведения
им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
leoner@mpi.ysn.ru



Рассмотрены научно-методические основы новой инновационной геофизической технологии, состоящей из двух наземных методов геоэлектрики: георадиолокационного и индуктивного электромагнитного зондирования. Технология ориентирована на всестороннее изучение в природных условиях и на застроенных территориях неоднородных анизотропных мерзлых грунтов, составляющих наиболее важный в строительном отношении слой годовых теплооборотов в сфере его механического, теплового и иного взаимодействия с фундаментами инженерных сооружений. Физической основой технологии является пространственно-временная зависимость скорости распространения и затухания импульсных и гармонических электромагнитных волн от строения, состава, свойств и состояния мерзлых грунтов. Однако главное внимание в технологии сосредоточено на изучении параметра затухания амплитуды волн, наиболее информативного и чувствительного к изменению всего внутреннего облика грунтовой среды. Методической основой технологии служит запатентованный новый способ многократных измерений сигналов георадиолокации и индукции с изменением положения и азимута излучающей и приемной антенны георадаров и аппаратуры индуктивной геоэлектрики в окрестности точек поисково-разведочной и мониторинговой сети геолого-геофизических наблюдений. При 36 измерениях сигналов георадиолокации и 8 измерениях сигналов индукции прямой и встречной установками относительная погрешность вычисления средних значений скорости, удельного послойного затухания и параметра амплитудного затухания волн во всем слое годовых теплооборотов не превышает 10%. Такой уровень точности вполне приемлем для решения широкого круга задач, касающихся научно-практического изучения мерзлых грунтов в целях информационного обеспечения криогенной безопасности России. Инженерно-геологическая эффективность технологии проиллюстрирована несколькими типичными примерами с пространственным изложением результатов электромагнитного зондирования в трех ключевых направлениях: изучения структуры, петрофизики и радиофизики мерзлых грунтов.

Ключевые слова: инновация, технология, мерзлые грунты, слой годовых теплооборотов, электромагнитные волны, сигналы георадиолокации и индукции, затухание.

Введение

Обычно под термином «технология» в самом широком смысле понимают последовательность действий, направленных на получение желаемого результата. Геофизические технологии, состоят из трех этапов получения конечного результата — частных или общих разной степени обобщения физико-геокриологических моделей (ФГКМ) строения, свойств и состояния вечно-многолетнемерзлых пород (далее, мерзлых грунтов), образующих криолитозону России и составляющие примерно 70% ее территории. На первом этапе выполняются полевые работы с измерением характеристик естественных и искусственных физических полей Земли. На втором камеральном этапе производится математическая обработка результатов измерений полей. И, наконец, на третьем самом сложном интеллектуальном этапе по результатам обработки принимаются априорные или апостериорные интерпретационные решения и строятся искомые

ФГКМ. Такова общность всех существующих в мире геофизических технологий. Разница лишь в подходах реализации научно-технических концепций и многообразии вариантов структуризации принимаемых на каждом этапе оригинальных решений в логической последовательности их развития и завершения в ФГКМ.

В настоящей работе рассматривается новая запатентованная [1] технология электромагнитных зондирований (ЭМЗ), созданная для изучения процесса затухания электромагнитных полей в верхней части криолитозоны преимущественно до глубины 10–20 м, т. е. в слое годовых теплооборотов. Технология создавалась на протяжении нескольких десятилетий и прошла всестороннюю научно-производственную апробацию на большом объеме разнообразного материала инженерно-геологических изысканий, выполненных на всей территории криолитозоны Республики Саха (Якутия), являющейся самым крупным регионом РФ. Начало разработки технологии было

положено в 1985 г. в Якутском тресте инженерно-строительных изысканий (ЯкутТИСИЗ), а работа над научно-методическими основами технологии была полностью завершена в Институте мерзлотоведения им. П. И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН в 2016 г. [2].

Инновационная значимость технологии

Инновация весьма гибкое понятие, но, несмотря на это, содержит в себе смысловой стержень системы взаимосвязанных подчиненных понятий, обозначающих в конечном итоге повышение эффективности технологических разработок. Именно поэтому в современном технократическом обществе с доминантой жесткой рыночной экономики создание такого рода инновационных технологий немыслимо без преодоления множества разнообразных препятствий и решения проблем, предметом изучения которых выступает, прежде всего, набор осмысленных обоснованных аргументаций и предложений, построенных на репрезентативном фактическом материале научно-технических исследований.

Применительно к рассматриваемой технологии ЭМЗ ее инновационная значимость обусловлена не столько научной новизной в части изучения процесса распространения сигналов георадиолокации и индукции в верхней части криолитозоны России, сколько, проистекающими из этой новизны практическими следствиями. Это и высокая производительность, и низкая стоимость в сравнении с традиционными геологическими технологиями, и минимизация риска нарушения окружающей природной среды и теплового режима криолитозоны и, наконец, высокая информативность, детальность и точность всестороннего (строение, состав, свойства, состояние) изучения мерзлых грунтов слоя годовых теплооборотов. Этот слой небольшой мощности наиболее важен для науки геокриологии, строительной индустрии и коммунального хозяйства с точки зрения изучения, протекающих в нем механических, тепловых и химических процессов взаимодействия мерзлых грунтов с фундаментами инженерных объектов, возведенных и эксплуатируемых в криолитозоне России по первому принципу строительства. Напомним, что речь идет о сохранении мерзлоты в грунтовых основаниях инженерных сооружений. Жизненная необходимость изучения слоя годовых теплооборотов и постоянного контроля в нем изменения температуры, льдистости, засоленности и других физико-химических показателей свойств мерзлых грунтов настолько важна, что ее без преувеличения правомерно назвать информационной стороной обеспечения криогенной безопасности России. Именно, в этом аспекте, а также на фоне санкций иностранных государств и смещения вектора развития производительных сил России в криолитозону Северо-Восточной Сибири, Дальнего Востока, Субарктики и Арктики с огромными природными богатствами, контрастно проявляется инновационная значимость новой технологии ЭМЗ, предлагаемой для быстрого экономичного экологически чистого всестороннего изучения мерзлых грунтов. К поиску и разработке таких технологий, названных почему-то критическими,

призывает руководство нашей страны академическое сообщество в лице Российской академии наук (РАН), рекомендуя сосредоточить усилия по двум направлениям, согласно перечню критических технологий РФ, который утвержден указом Президента РФ от 7 июля 2011 г., № 899. Первое направление — мониторинг и прогноз состояния окружающей среды с предотвращением и ликвидацией ее загрязнения (п. 19 перечня). Второе направление — предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (п. 21 перечня) [3].

Инновационная значимость технологии ЭМЗ в информационном обеспечении криогенной безопасности России, в которую выгодно вкладывать большие капиталовложения государства и крупных бизнес структур, конкурентно усиливается в сравнении с инженерно-геокриологическими возможностями других многочисленных наземных геофизических технологий. В России нет аналогичных технологий, которые бы решали с приемлемой для практики точностью неординарные задачи петрофизики: количественной оценки основных в строительном отношении показателей свойств мерзлых грунтов (температуры, теплоемкости, льдистости, засоленности, прочности).

Свидетельств такому заявлению достаточно. Приведем лишь некоторые и наиболее авторитетные свидетельства. Все они выражают незаинтересованность академических институтов РАН и образовательных учреждений в условиях изматывающего хронического недофинансирования научно-исследовательских работ (НИР) заниматься поиском и разработкой наземных геофизических технологий, ориентированных на всестороннее изучение мерзлых грунтов. Действительно, как можно заниматься решением этой задачи, когда в настоящее время бурение даже минимально необходимого числа скважин (3-5) до глубины 10-20 м с отбором проб на лабораторное определение свойств мерзлых грунтов представляет зачастую неразрешимую проблему из-за нежелания заказчиков изыскательских работ оплачивать эти, как им кажется ненужные виды исследований. Отчасти поэтому петрофизический потенциал технологий остается весьма слабоизученным в сравнении с их картографическими возможностями, активно используемых в строительной индустрии, коммунальном хозяйстве, а также энергетике, транспорте и других областях промышленного освоения криолитозоны России.

Со стороны образования свидетельство отсутствия в России рассматриваемой технологий ЭМЗ, совмещающей в себе картографические и петрофизические возможности всестороннего изучения мерзлых грунтов, представляет учебник Ю. Д. Зыкова по геофизике криолитозоны [4]. В нем тщательно собрана ценная информация, но в ней нет ни одного примера и даже ссылки на другие работы, в которых бы решалась задача количественной оценки показателей свойств мерзлых грунтов по затуханию электромагнитных полей в слое годовых теплооборотов. Получается, что студентов — будущих геофизиков, изначально не ориентируют на необходимость решения таких сложных задач, развивающих теорию электродинамики неоднородных анизотропных геологических сред.

В частности, мерзлых дисперсных грунтов, которым в особенной степени присущи эти качества. И это в высшей степени непонятно, если вспомнить, что Ю. Д. Зыков был одним из организаторов и руководителей НИР по созданию рекомендаций определения физико-механических свойств мерзлых дисперсных грунтов [5]. В прошлом веке этот документ Госстроя СССР, являющийся совместной разработкой производственного научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) и научно-исследовательского института оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова (НИОСП), был воплощением поистине научно-производственного прорыва в области петрофизики мерзлых грунтов.

Еще одним свидетельством со стороны образования, но на этот раз в форме нежелания обратить внимание на разработанную технологию ЭМЗ и признать ее, как новый вклад в науку, служит редкое по охвату учебного материала пособие МГУ им. М. В. Ломоносова по георадиолокации М. Л. Влодова и М. С. Судаковой [6]. В нем, как и в электронных презентациях докладов и сборнике тезисов международной конференции по георадиолокации «Георадар-2017» (г. Москва), тоже нет ни одного упоминаний о технологиях, аналогичных технологии ЭМЗ. Есть только единственное предложение М. Л. Влодова и М. С. Судаковой считать решение геокриологических задач перспективным направлением георадиолокации [6]. Только и всего, но и этого достаточно, чтобы понять неутешительное положение дел в георадиолокации с вынужденным и хочется надеяться, временным трендом уклонения от решения трудоемких и дорогостоящих задач петрофизики мерзлых грунтов. Именно, временным уклонением, так как обоснование физических предпосылок количественной оценки свойств мерзлых грунтов методами геоэлектрики давным-давно сделано трудами таких замечательных геофизиков, как А. А. Петровский, А. Т. Акимов, Б. Н. Достовалов, В. С. Якупов, А. Д. Фролов и многих других.

Со стороны академической науки геокриологии свидетельством полного отсутствия технологий ЭМЗ являются результаты прошедшего в 2017 г. в г. Магадане XI международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения [7]. Увы, из него, как и из предыдущих научных форумов: X симпозиума, прошедшего в Китайской Народной Республике в 2014 г. (г. Харбин) и IX симпозиума, прошедшего в г. Мирный в 2011 г., следует, что проблемы изучения петрофизики мерзлых грунтов, как таковой в инженерном мерзлотоведении не существует. А, ведь она является корневой не только в развитии фундаментальных основ науки мерзлотоведения, но и очерчивания контуров будущей науки криософии Земли [8, 9].

В многочисленных публикациях прошлого века [10, 11] также нет места технологиям всестороннего изучения мерзлых грунтов по затуханию электромагнитных полей. Большая часть работ того времени освещала типичные частные вопросы общей и инженерной геокриологии. А именно, картирования границ распространения по площади и глубине мерзлых грунтов, подземных льдов, таликов, а также относительной

изменчивости строения и физико-химических свойств и состояния мерзлых грунтов, не касаясь вопросов количественной оценки температуры, льдистости и других их свойств по динамическому атрибуту электромагнитных полей в слое годовых теплооборотов.

Современный период времени также не отличается появлением технологий, ориентированных на решение задач петрофизики мерзлых грунтов методами электромагнитных зондирований. В этом легко убедиться, обратившись к постоянно обновляемому А. П. Зарубиным библиографическому списку работ по геоэлектрике на переменном токе [12]. В этом списке, состоящем из 1258 названий за 1990-2017 гг., нет ни одной технологии, изучающей мерзлые грунты по затуханию электромагнитных полей в слое годовых теплооборотов или ином слое криолитозоны России.

Со стороны зарубежных источников свидетелем отсутствия интереса к изучению петрофизики мерзлых грунтов может служить авторитетнейший журнал международной ассоциации мерзлотоведения «Permafrost and Periglacial Process», в котором освещаются проблемы и результаты исследований в области геокриологии, гляциологии и других, сопряженных с ними наук, изучающих мерзлоту, как планетарное явление во всем ее криогенном многообразии. Так вот, анализ выпусков журнала за период 2003-2017 гг. показал, что из 536 публикаций всего 4,7% затрагивали общие вопросы применения наземных геофизических технологий, не касаясь специальных вопросов решения петрофизических задач в части количественной оценки температуры, льдистости и иных свойств мерзлых грунтов по затуханию электромагнитных волн.

По другим характеристикам, дающих представление о результате распространения в мерзлых грунтах большей частью искусственно созданных физических полей Земли, есть работы петрофизической направленности, но и они носят исключительно эпизодический характер. Например, в работе G. R. Olhoeft в 1978 г. на образцах мерзлых грунтов изучена связь электросопротивления, действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости с температурой мерзлых грунтов в диапазоне +20...–30°C [13]. В том же году М. К. Seguin обнаружил в скважинах, пробуренных в северной части Нового Квебека на полуострове Унгава и в центральной части Арктических островов сильную нелинейную связь между температурой разных литотипов пород и электросопротивлением в диапазоне +6...–8°C [14].

Еще один факт обнаружения, заметной по шкале Чедока, корреляционной связи электросопротивления на постоянном токе с температурой мерзлых илисто-песчаных отложений опубликован в одном из журналов издательства John Wiley & Sons, Ltd [15]. В этом источнике описан эксперимент, выполненный в Канаде в штате Юкона в области островного и сплошного распространения мерзлоты методом электротомографии в разных ландшафтно-геоморфологических условиях (буграх пучения, намывных насыпях, гористых участках и т. д.).

Судя по аннотации работы обзорного характера, намерение зарубежных коллег продолжать решать

сложные задачи петрофизики мерзлых грунтов, частично реализовано в 2007-2012 гг. в долгосрочном мониторинге и краткосрочных технологических исследованиях содержания подземного льда методом электротомографии [16]. Автор обзора осторожно подчеркивает, что существующие подходы количественной оценки льда и контроля его изменчивости требуют существенной доработки для применения методов геофизики в геотехническом и численном моделировании задач геокриологии. К сожалению, из-за отсутствия доступа к полному тексту обзора на платном сайте зарубежного журнала остается не выясненным вопрос: применяется ли затухание электромагнитных полей в решении таких задач? Ссылки, сделанные в работе М. Л. Влодова и М. С. Судаковой [6] на иностранные источники, указывают, скорее всего, на отсутствие таких технологий в методе георадиолокации иначе бы они обязательно были замечены этими известными в нашей стране геофизиками МГУ им. М. В. Ломоносова. Что касается других методов геоэлектрики, то поставленный вопрос требует дальнейших исследований в зарубежной библиографии.

Итак, список приведенных свидетельств говорит о том, что в России нет технологий ЭМЗ, изучающих мерзлые грунты слоя годовых теплооборотов по затуханию электромагнитных полей. С большой вероятностью их нет и за рубежом.

Описание технологии

В настоящей работе из-за ограниченности объема журнальных публикаций даются только основные сведения о сути и отличительных особенностях, оттеняющих новизну главных элементов технологии ЭМЗ в сравнении с иными геофизическими технологиями. Полное и подробное ее описание заинтересованный читатель найдет в методическом руководстве по георадиолокации [17], научно-методических основах электромагнитных зондирований [2] и формуляре патента [1].

Технология ЭМЗ состоит из двух наземных высокочастотных методов геоэлектрики, оптимально дополняющих друг друга в экономическом, технико-методическом, информационном и экологическом отношении, органично вписывающихся в структуру традиционной геологической технологии изучения мерзлых грунтов методом бурения скважин на всех стадиях проектно-изыскательских работ.

Главным методом в технологии ЭМЗ является метод георадиолокации с присущей ему очень высокой информативностью, детальностью и высокой точностью изучения по затуханию импульсного электромагнитного поля структурных и петрографических границ мерзлых грунтов. Вспомогательный метод в технологии ЭМЗ — метод индукции, не менее чувствительный к изменению свойств и состояния мерзлых грунтов, но уступающий методу георадиолокации в детальности и точности изучения глубины залегания и очерчивания границ неоднородностей сложной конфигурации. Мерзлые грунты изучаются методом индукции по затуханию гармонического поля высокочастотного вертикального магнитного диполя (ВВМД).

Оба метода работают в спектре излучения и приема высокочастотных (более 10^4 Гц) электромагнитных полей. Метод георадиолокации использует разнообразный технический арсенал (георадары) с очень широкой полосой частот, но при изучении мерзлых грунтов слоя годовых теплооборотов мощностью преимущественно 10-20 м, используется диапазон частот в несколько десятков или сотен мегагерц. Метод индукции, в том техническом варианте, в котором был апробирован в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока с аппаратурой «СЭМЗ» [2, 18, 19], в настоящее время использует современную аппаратуру «КАВ-ЭММ» [20] с цифровой индикацией измерения поля ВВМД. Эта аппаратура, как и аппаратура «СЭМЗ», включает в себя комплект кольцевых приемно-излучающих антенн диаметром 30 см, настроенных на 4 частоты: 0,280; 0,560; 1,125; 2,250 МГц.

В методе георадиолокации измеряется время задержки и амплитуда напряженности электрической составляющей электромагнитного поля в виде следующих друг за другом радиоимпульсов, отраженных от границ геологической среды, в частности, мерзлых грунтов. Совокупность импульсов образует сигнал георадиолокации, который рассматривается, как простой по виду, но самый сложный по внутреннему содержанию итоговый результат кинематического распространения и энергетического взаимодействия электромагнитного поля в виде волны в неоднородных анизотропных мерзлых грунтах.

В методе индукции измеряется только амплитуда напряженности вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_r) магнитных составляющих поля ВВМД. Так как оно изучается в ближней и промежуточной зоне, то не распространяется в виде волны, находясь в так называемом диффузионном состоянии. Совокупность измеренных на заданной частоте значений амплитуд H_z и H_r в зависимости от расстояния между изучающей и приемной антеннами (точечными диполями) будем называть сигналами индукции.

Технология ЭМЗ имеет два принципиальных отличия от других геофизических технологий. Первое отличие — многократные измерения сигналов георадиолокации и индукции, а второе — изучение меры относительной скорости затухания этих сигналов в слое годовых теплооборотов. Иллюстрация этих отличительных особенностей показана для сигналов георадиолокации на рис. 1.

Как видим, способ многократных измерений сигналов георадиолокации в некоторой окрестности точек сети геолого-геофизических наблюдений с изменением положения и ориентации излучающей и приемной антенн георадара [1] обнаруживает непредсказуемую картину случайной изменчивости количества зарегистрированных радиоотражений и их параметров: времени задержки в наносекундах и амплитуды в количестве ее дискретных разбиений. Понятно, что в таких условиях неопределенности по единичным реализациям сигналов георадиолокации невозможно принять правильные интерпретационные решения, построить частные или общие разного уровня обобщения физико-геоэлектрические модели (ФГКМ) и на их основе получить достоверные результаты

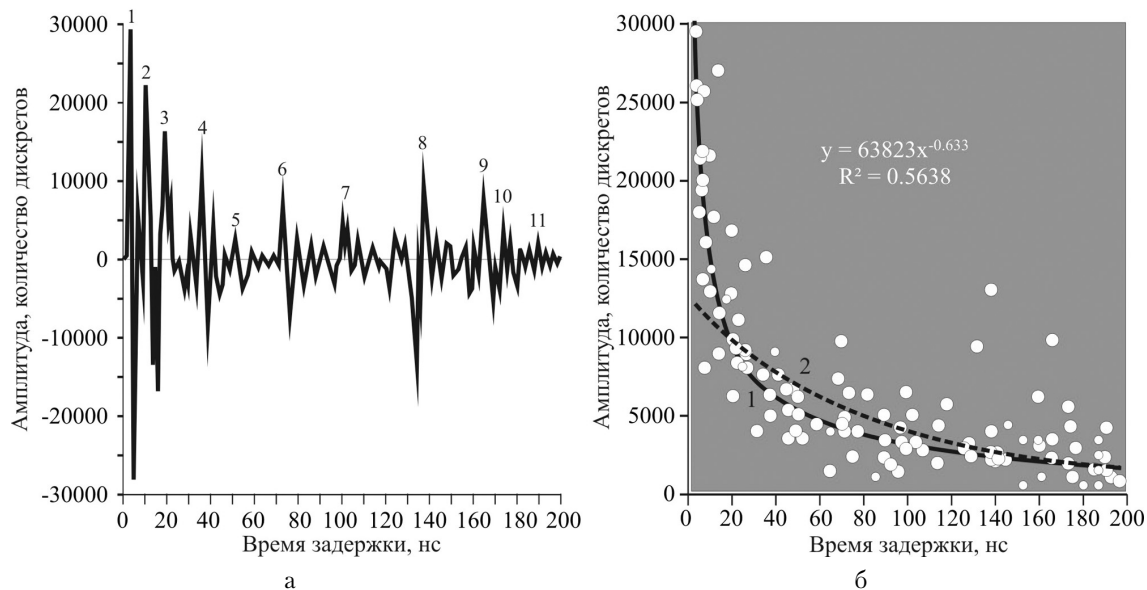


Рис. 1. Фрагмент записи в Западной Якутии сигнала георадиолокации георадаром SIR-2000 на центральной частоте 270 МГц с порядковыми номерами радиоотражений (2-11) в скальном массиве мерзлых грунтов (а) и поле амплитудно-фазовых вариаций радиоотражений положительного знака с аппроксимацией их затухания уравнениями степенной (1) и экспоненциальной (2) функций (б) [2]. Радиоотражение № 1 — зондирующий импульс длительностью 5 нс

обо всем внутреннем облике неоднородных анизотропных мерзлых грунтов. Максимально приблизить получаемый результат георадиолокации к 70% уровню достоверности, принятому с давних пор в геологоразведке для всех наземных методов геофизики, изучающих месторождения полезных ископаемых, удастся при переходе из неустойчивого метрического пространства единичных измерений в устойчивое метрическое пространство средних значений параметров когерентных радиоотражений. Благодаря этому при 36 измерениях сигналов георадиолокации в окрестности скважин с радиусом равным радиусу первой зоны Френеля (не более 5 м) относительная погрешность расчета по времени задержки и амплитуде когерентных радиоотражений средних значений скорости и удельного затухания электромагнитных волн в слоях мерзлых грунтов не превышает 10% [17].

Применительно для изучения процесса затухания электромагнитных волн в слое годовых теплооборотов переход в устойчивое метрическое пространство средних значений упрощается аппроксимацией трансцендентными функциями поля вероятностного распределения или рассеяния радиоотражений. В таких случаях, как показали испытания технологии ЭМЗ [2], надежной статистической мерой затухания волн служит параметр амплитудного ослабления сигналов георадиолокации (k). В отличие от классического теоретического безразмерного абсолютного коэффициента затухания волн, параметр k относителен и зависит от множества условий его определения, но при всем этом, он оценивается простейшим способом по показателю степенной функции. В сравнении с альтернативной экспоненциальной функцией степенная функция более корректно и точно выделяет закономерную (детерминированную) составляющую уменьшения амплитуды сигналов георадиолокации и индукции в очень сложной геологической среде — неоднородных

анизотропных мерзлых грунтах. В таких средах экспоненциальная функция, являющаяся, как известно, математическим эталоном затухания электромагнитных волн в идеализированных теоретических моделях однородных изотропных геологических сред, дает явно неудовлетворительный результат аппроксимации для сигналов георадиолокации и отчасти удовлетворительный для сигналов индукции (рис. 2, график 1). Объясняется такое несогласие меньшей их частотой в сравнении с сигналами георадиолокации, а значит и разницей длин электромагнитных волн в мерзлых грунтах, а она весьма большая. В рассматриваемых примерах длина соответствующей волны в мерзлых долеритах Западной Якутии составляет порядка одного метра, а в мерзлых дисперсных грунтах Центральной Якутии около 100 м. То есть мерзлые грунты слоя годовых теплооборотов более тонко реагируют или откликаются на импульсное более высокочастотное электромагнитное возбуждение, нежели на гармоническое индуктивное менее высокочастотное возбуждение. В этом случае методом индукции в большем объеме грунтовой среды (в радиусе до 30-50 м) изучаются не детали, а главные черты ее реакции. Конечно же, такой сглаженный вид реакции имеет свою ценность в построении высокого уровня обобщения ФГКМ и раскрытии в них общих закономерных отношений между геофизическим параметром k и лабораторными показателями состава, свойств и состояния мерзлых грунтов.

В рассматриваемом примере, взятом из результатов работ методом георадиолокации в Западной Якутии (пос. Чернышевский) параметр k довольно высок и равен $-0,633 \text{ нс}^{-1}$ (см. рис. 1, б). Не низка и степень совокупного косвенного влияния мерзлотно-грунтовых факторов на снижение амплитуды радиоотражений в слое годовых теплооборотов в зависимости от глубины его изучения, т. е. времени задержки радиоотражений.

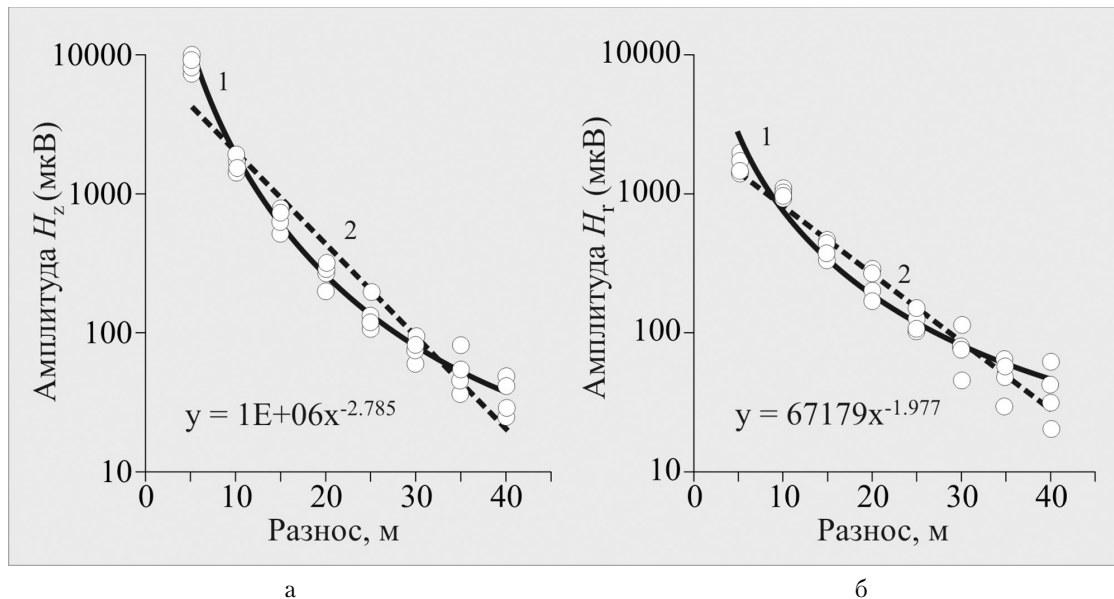


Рис. 2. Типичные графики измерений на частоте 1,125 МГц амплитуды сигналов индукции (вертикальной (а) и горизонтальной (б) магнитной составляющей поля ВВМД) в 4-х азимутах в окрестности точек скважин, пробуренных в мерзлых дисперсных грунтах песчано-глинистого состава на территории криолитозоны Центрально-Якутской низменности [2]

По коэффициенту множественной корреляции (R^2) доля влияния обозначенных факторов оценивается в 56,4%.

Уместно сказать, что в целом относительно высокие и низкие значения k соответственно означают мерзлые грунты с низкими и высокими строительными качествами. Высокими значениями обычно отличаются мерзлые малопрочные полускальные грунты и высокотемпературные, сильнозасоленные дисперсные грунты глинистого состава, а также все литотипы грунтов, находящихся в талом состоянии. В рассматриваемом примере высокое значение k мерзлых скальных грунтов (интрузивных пород долеритов), слагающих правое береговое примыкание плотины крупного гидротехнического сооружения (Вилуйской ГЭС 1-2), указывает на существенное снижение их природной прочности совокупным действием двух причин: взрывными работами при строительстве плотины и боковым тепловым влиянием со стороны водохранилища. В естественных условиях за пределами действия этих причин прочность массива мерзлых долеритов существенно увеличивается со снижением средних значений k до $-0,192 \text{ нс}^{-1}$.

Несмотря на простоту технологии ЭМЗ и другие ее достоинства вместе с очевидной информационной емкостью параметра k геофизики не обращают на нее внимания и руководствуются ранее разработанной А. В. Омельяненко технологией дискретной георадиолокации [21] и технологией непрерывной георадиолокации, созданной под руководством М. И. Финкельштейна [22]. По-прежнему, но уже на современном техническом уровне записываются радарограммы по одноразовым измерениям многократно накопленных сигналов георадиолокации по линиям профилей с неизменным положением и ориентацией антенн георадаров в окрестности точек поисково-разведочной или мониторинговой сети геолого-геофизических наблюдений. Эти методики, принятые для всеобщего

употребления, полностью игнорируют не только огромный опыт работ, образно говоря, старших сестер георадиолокации — гражданской метеорадиолокации атмосферы Земли и военной радиолокации, но и важнейшие результаты исследований ученых гляциологов, изучавших мощность, строение и состояние ледников. Например, ученых Л. А. Суханова и А. А. Богородского, которые в 1968 и 1975 гг. экспериментально обнаружили по амплитудно-фазовым вариациям радиоотражений стохастическую природу результата распространения высокочастотных импульсных электромагнитных волн в горном леднике Джанкуат [23] и ледниках Антарктиды и Арктики [24].

В немерзлых и мерзлых грунтах случайные амплитудно-фазовые вариации сигналов георадиолокации независимо наблюдались автором настоящей работы и другими геофизиками НПО «Стройизыскания» в 1980-х гг. В это время по заданию Госстроя РСФСР проводились беспрецедентные по масштабу государственные испытания одного из первых серийных образцов георадарной техники — аппаратуры 17ГРЛ-1 и вместе с ней инженерно-геологических возможностей метода дискретной георадиолокации на застроенной территории России, включая криолитозону Якутии. Краткое сообщение о ключевых положениях методики учета этих вариаций при изучении в Центральной Якутии границ природно-техногенных таликов сложной конфигурации появилось в 1989 г. [25].

Увы, прошло много лет, но призыв известного в нашей стране и за рубежом ученого А. А. Богородского использовать методы математической статистики и теории вероятности для подавления амплитудно-фазовых флуктуаций, остается без должного внимания и отклика у современных геофизиков. По данным дискретной или непрерывной георадиолокации они строят модели геологической среды и обосновывают интерпретационные решения, опираясь на ложные

представления о строго обусловленном причинно-следственными отношениями, детерминистическом характере поля радиоотражений, образовавшихся в результате прохождения импульсных высокочастотных электромагнитных волн. Более того, несмотря на имеющийся фактический материал у геофизиков нет доверия, как им представляется, к примитивному и не заслуживающему серьезного внимания способу количественной оценки затухания волн, как это делается в технологии ЭМЗ на основе многозависимых измерений сигналов георадиолокации. Необходимость изучения динамики волн признается, но вместо прямого изучения эффекта затухания наблюдаемого по картине спада амплитуд радиоотражений в зависимости от времени их задержки предлагается окольный косвенный путь.

Вариантов пути два. Первый вариант наиболее сложен для понимания и весьма затруднителен в части получения практических результатов из-за отсутствия сертифицированных компьютерных программ. В этом варианте затухание сигналов георадиолокации изучается посредством расчета электрической проводимости геологической среды по телеграфным уравнениям электродинамики электромагнитного поля [26]. Во втором варианте, более простом, понятном и доступном для практического употребления, мера затухания волн количественно оценивается по результатам спектрального анализа сигналов георадиолокации. Этот вариант был озвучен в презентации доклада А. М. Пятиловой на международной конференции «Георадар-2017» [27].



Рис. 3. Общая структура новой электромагнитной технологии всестороннего изучения мерзлых грунтов криолитозоны России [2]

Прямо скажем, странная сложилась ситуация в георадиолокации в сравнении не только с радиолокацией, но и с положением дел в отечественной и зарубежной сейсмометрии, где уже на протяжении нескольких десятилетий в обязательном порядке применяются характеристики затухания упругих волн при поисках неструктурных месторождений нефти и газа. Как бы там ни было, но именно в изучении параметра k состоит главная ценность технологии ЭМЗ, так в этом параметре на эмерджентном уровне соединяются в единое целое потоки частной информации со стороны базовых характеристик электрофизических свойств мерзлых грунтов: электрической проводимости и комплексной диэлектрической проницаемости. В таком комплексном интегрированном виде они несут на более высоком системном уровне информацию обо всех тех сложнейших физико-химических процессах, которые протекают в мерзлых грунтах слоя годовых теплооборотов при его возбуждении импульсными и гармоническими электромагнитными полями.

В целом, структура новой инновационной технологии ЭМЗ (рис. 3), ориентирована на всестороннее изучение методами георадиолокации и индукции не только мерзлых, но и немерзлых грунтов по трем направлениям: инженерно-геологическом (структурная геология), петрофизическом и радиофизическом. В этой технологии, кроме указанных компьютерных программ при необходимости могут применяться любые другие программы цифровой обработки кинематических и динамических атрибутов сигналов георадиолокации и индукции.

Примеры применения технологии

Из множества имеющихся примеров успешного применения технологии ЭМЗ на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока (Республике Саха (Якутия), Забайкальского края, Амурской области) ограничимся выборкой примеров и их описанием, дающих представление об инженерно-геокриологических возможностях технологии по трем выше обозначенным направлениям изучения грунтовой среды.

Первый пример — изучение строения мерзлых грунтов (рис. 4).

Работы проводились в 2003 г. по заданию ОАО «Якутпроект» на стадии рабочего проекта в пос. Жатай (пригород г. Якутска) на участке горизонтального слипа судостроительного и ремонтного завода (ССРЗ) [2]. Электромагнитное зондирование грунтового основания, находящегося в мерзлом состоянии выполнялось на застроенной территории в свободных промежутках по линиям разнонаправленных профилей методом непрерывной георадиолокации с георадаром «ОКО-1М» с антеннами, настроенными на центральную частоту спектра излучения-приема в воздухе 250 МГц. Вокрестности точек зондирования, номера которых указаны на горизонтальных осях рис. 4, для вероятностно-статистической обработки и динамического преобразования радарограммы по программе «PolnGrad», осуществлялась линейная сборка из 15 трасс сигналов георадиолокации, записанных через 20 см.

На записи исходной радарограммы нет никакой информации о строении грунтового основания ССРЗ,

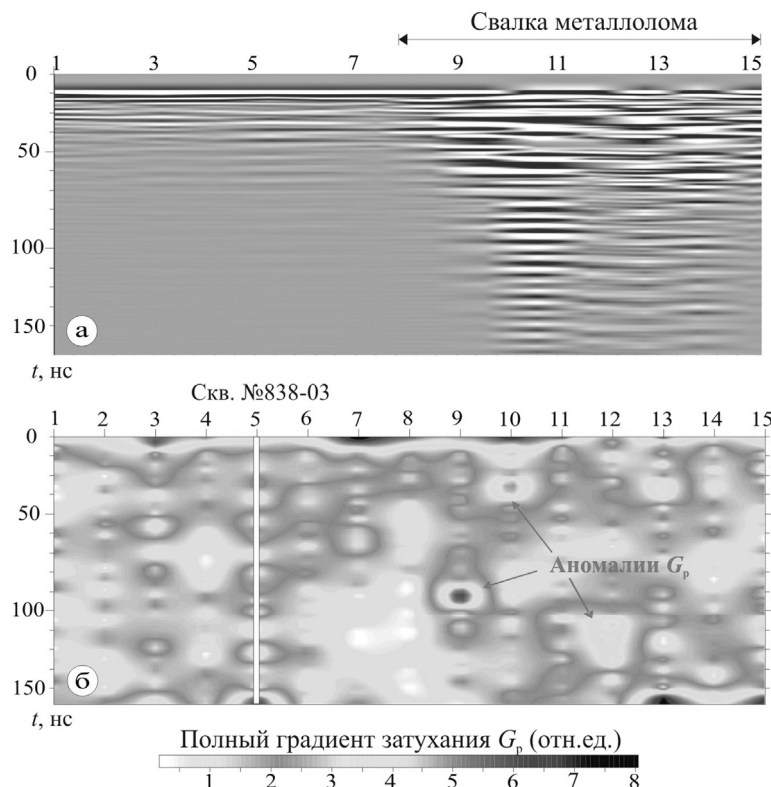


Рис. 4. Исходный вид радарограммы (а) и результат ее динамического преобразования по алгоритму полного градиента затухания амплитуд сигналов георадиолокации, собранных в окрестности точек электромагнитного зондирования по методике линейного группирования [2]

кроме системы радиоотражений с временной задержкой до 50 нс (вертикальная шкала радарограммы) от границ неизвестной природы в верхней части разреза. Более того большая часть радарограммы непригодна для изучения строения грунтового основания ССРЗ из-за мощного экранирующего влияния свалки металлолома между точками зондирования 8-15 (рис. 4, а). После динамического преобразования радарограммы явилась совершенно иная картина строения грунтового основания ССРЗ, в которой не осталось ни следа от маскирующего влияния свалки металлолома. Структура распределения значений математической производной затухания в обобщенном виде весьма правдоподобно передает истинную структуру геологического строения аллювиальных отложений береговой части протоки р. Лены, где построен завод. Об этом свидетельствуют результаты бурения заверочной (контрольной) скважины № 838-03.

В соответствие с результатами контрольного бурения из шести аномалий G_p четыре соответствуют присутствию в разрезе массива песчаных мелко-

среднезернистых отложений линз и прослоев в разной мере заторфованных супесей и суглинков мощностью от 0,2-0,5 до 1-3 м и протяженностью от 1-2 до 5-7 м.

Принимая во внимание малую вероятность изменчивости главных особенностей строения аллювиальных отложений с одинаковым ландшафтно-геоморфологическим обликом небольшого участка долины р. Лены (длина профиля на нем равна 70 м), установленную идентификацию природы аномалий G_p правомерно распространить на весь изученный участок ССРЗ. В таком случае появляется возможность оценить по количеству аномальных значений G_p (выше 1,0-1,5 отн. ед.) в прочном мерзлом песчаном массиве долю присутствия линз и прослоев супесей и суглинков. Они опасны тем, что при замачивании способны непредсказуемым образом мгновенно и неравномерно проседать. Статистика, сделанная по всем линиям георадиолокационных профилей, говорит, что такие в общем, неблагоприятные для строительства и эксплуатации инженерных объектов грунтовые разности составляют 53%.

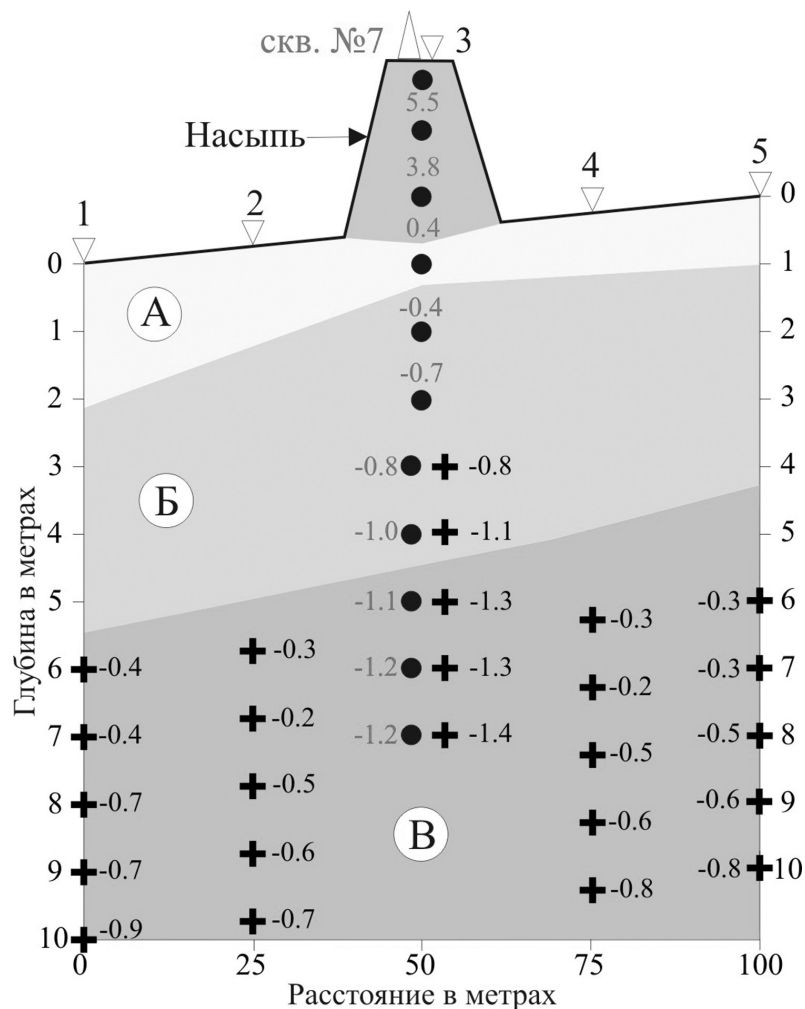


Рис. 5. Тепловое состояние осенью 2011 г. грунтового основания автодороги «Амур» (Чита-Хабаровск) по геолого-геофизическому створу термометрии. А – сезонноталые грунты; Б – мерзлые дресвяно-щебенистые грунты коры выветривания коренных пород; В – относительно сохраненные коренные породы (граниты). Кружки и крестики с цифрами означают точки определений температуры ($^{\circ}\text{C}$) методом термометрии (точка скважины № 7) и методом индукции (точки электромагнитных зондирования №№ 1-5) [28]

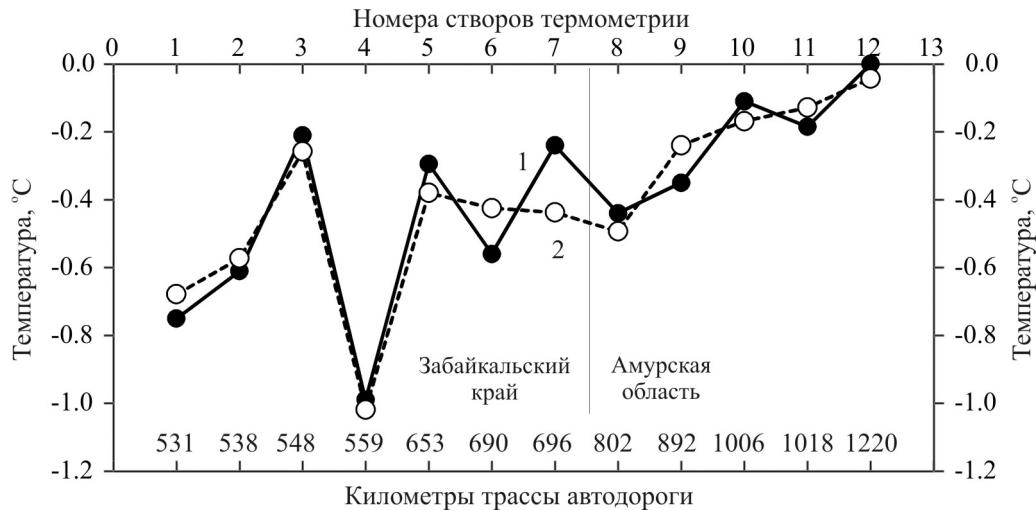


Рис. 6. График линейной пространственной динамики усредненного теплового поведения на глубине 6-10 м грунтового основания автодороги «Амур» осенью 2013 г. по данным полупроводниковой термометрии скважин (1) и электромагнитной термометрии слоя годовых теплооборотов методом индукции (2) [28]

Таким образом, применение технологии ЭМЗ с изучением поля затухания импульсных электромагнитных волн предоставило заказчику, безусловно, важную информацию о неоднородном строении мерзлого песчаного основания ССРЗ, обнаружив, что он почти наполовину сложен просадочными грунтами, которые ни в коем случае нельзя замачивать техногенным поступлением воды с поверхности Земли. Кроме того криогенное состояние грунтового основания ССРЗ нужно постоянно контролировать со стороны сильного теплового воздействия воды протоки р. Лены и решать эту задачу, опять же, технологией ЭМЗ, следует в системе локально-объектного температурного мониторинга.

Второй пример — изучение теплового состояния и поведения мерзлых грунтов в основаниях линейных сооружений (рис. 5, 6).

Эта задача успешно была решена методом индукции в ходе геокриологических исследований, проведенных в 2014 г. ИМЗ СО РАН в рамках научного сопровождения инженерно-геологических изысканий, с целью установления причин образования просадок и деформаций на аварийных участках автодороги «Амур» (Чита-Хабаровск), соединяющей Забайкальский край и Амурскую область [28].

Результат частной диагностики динамики теплового состояния по глубине основания автодороги «Амур» в Забайкальском крае показан по одному из поперечных створов термометрии на 559 км плюс 785 м, где была пробурена только одна опорная скважина № 7. В дополнение к ней в 5 точках по линии створа были выполнены электромагнитные зондирования с аппаратурой «СЭМЗ» на частоте 1,125 МГц.

Анализ общего геотермического разреза, построенного по данным полупроводниковой и электромагнитной термометрии в точке скважины № 7, говорит о том, что на этом участке грунтовое основание автодороги «Амур» находится в сложном тепловом состоянии, как по глубине, так и в поперечном направлении. В центре автодороги мерзлые грунты залегают на глубине 3,5 м с температурой $-0,4^{\circ}\text{C}$. Начиная с глубины 7,3 м, где

залегают скальные грунты, температура опускается до -1°C . В 25 м от оси автодороги температура резко повышается и на глубине 6 м достигает $-(0,3...0,4)^{\circ}\text{C}$.

Температурная разница по отношению к точке скважины № 7 довольно высока и в среднем составляет $0,85^{\circ}\text{C}$ при горизонтальном градиенте $0,034^{\circ}\text{C}/\text{м}$. Почему так происходит, трудно понять. Однако если принять во внимание просадки дорожного полотна и полученные в 2012 г. данные радиоимпедансного зондирования, то неравномерное распределение значений температурного поля объясняется пересечением автодороги сильнольдистых грунтов или линзы подземного льда, слагающих заболоченную пойму долины ручья Гурьев. В таком варианте объяснения насыщение грунтового основания по оси автодороги сегрегационным или структурным льдом и приводит к понижению температуры мерзлых грунтов, создавая температурный контраст на фоне более высоких температур боковых грунтовых примыканий автодороги.

Вероятностная структура ошибок вычислений по данным метода индукции значений температуры грунтового основания автодороги «Амур» в сравнении с данными термометрии 12 скважин, пробуренных на большом удалении друг от друга в Забайкальском крае и Амурской области, представлена в табл. 1. Из нее следует, что в этих регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока вычисления температур грунтов на глубине 6-10 м, сделанные по параметру k , с вероятностью 67 и 52% имеют незначительную абсолютную ошибку (не более $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$) близкую к ртутной и полупроводниковой термометрии скважин ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$). В подавляющем большинстве случаев (вероятность $(100...76)\%$) абсолютная ошибка все еще приемлема для практического решения задач и не превышает $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Что касается средней нулевой абсолютной ошибки, то ее разброс в пределах границ диапазона доверительной вероятности 95% равен $\pm(0,13...0,18)^{\circ}\text{C}$ и может соперничать с термометрией скважин, хотя это и звучит вызывающе. Тем не менее, такой высокий показатель точности оценки средней температуры по параметру k , ориентирует в будущем дальнейший научный поиск в

ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АРКТИКИ

Таблица 1
Вероятностная структура ошибок вычисления температуры основания автодороги «Амур» на глубине 6-10 м [28]

Категория точности вычисления температуры	Интервал ошибки (°C)	Вероятность, %	
		Забайкальский край (N=45)	Амурская область (N=25)
Высокая	$\pm 0,0-0,2$	67	52
Средняя	$\pm 0,2-0,5$	33	24
Низкая	$\pm 0,5-1,0$	нет	24
Очень низкая	более $\pm 1,0$	нет	нет

Примечание: N — число определений методом индукции температуры в интервале глубины 6-10 м.

части разработки полностью автоматизированных технологий ЭМЗ со сбором очень большого совокупного числа измерений сигналов индукции, георадиолокации и их математической обработкой в режиме реального времени. В таком же режиме, т. е. непосредственно в условиях полевых работ оператор-геофизик должен иметь возможность видеть на экране монитора ноутбука кроме картины строения границ мерзлых грунтов картину изменчивости температуры, льдистости и других интересующих показателей свойств мерзлых грунтов. Более того, у оператора-геофизика должна быть легкодоступная возможность при необходимости оперативно корректировать наблюдаемую картину изменчивости свойств мерзлых грунтов путем ввода в память базы знаний ноутбука новых параметров в те уравнения регрессии, которые связывают статистическими связями геолого-геофизические характеристики грунтовой среды. Причем, автоматизированные системы ЭМЗ для кардинального снижения ошибок вычисления температуры и показателей свойств мерзлых грунтов должны быть ориентированы на сбор исходной информации по нескольким точкам электромагнитных зондирований с многократными измерениями сигналов индукции и георадиолокации в окрестности каждой точки сети геолого-геофизических наблюдений.

Впрочем, единичные количественные оценки температур по параметру k тоже вполне пригодны в тех случаях, когда предметом изучения методом индукции на стадиях диагностики и мониторинга выступает отслеживание сезонных или межгодовых трендов относительной пространственно-временной динамики уровня и направленности температурного поля в основаниях линейных и площадных инженерных сооружений.

В рассматриваемом примере линейная динамика поведения средних значений температурного поля

в основании автодороги «Амур» на глубине 6-10 м, несмотря на локальные тепловые вариации с амплитудой $\pm(0,2...0,5)^\circ\text{C}$, сохраняет закономерный и почти линейный тренд с ростом температуры от $-0,8^\circ\text{C}$ в Забайкальском крае до $0,0^\circ\text{C}$ в Амурской области. Согласованность данных электромагнитной и полупроводниковой геотермии скважин в оценке относительных изменений теплового состояния основания автодороги на глубине 6-10 м высока как в региональном масштабе, так и в местных особенностях. По коэффициенту корреляции мера согласованности геолого-геофизических температурных рядов составляет 0,94.

Практический аспект результатов применения технологии ЭМЗ в лице метода индукции состоит в верификации точности вычисления температуры мерзлых грунтов по параметру k в сравнении с эталонным методом полупроводниковой геотермии скважин. Достигнутая точность удовлетворяет требованиям проектно-изыскательских и мониторинговых работ на стадиях диагностики теплового состояния мерзлых оснований линейных сооружений и контроля динамики их пространственно-временного поведения. Максимум геолого-экономической эффективности технологии ЭМЗ, испытанной на автодороге «Амур», достигается при функционировании объектно-локальных сетей долговременного температурного мониторинга. Результаты исследований использованы заказчиком ОАО «Иркутскгипродорнии» для разработки мер по нейтрализации процессов просадок и устранению деформаций на автодороге «Амур».

Третий пример — радиофизика (изучение нормативных значений скорости распространения и затухания импульсных и гармонических электромагнитных волн в мерзлых грунтах слоя годовых теплооборотов (табл. 2-4)).

Априорное знание этой информации всегда важно для практической деятельности геофизиков, работающих в области инженерной геологии, мерзлотоведения и грунтоведения. Особую ценность она приобретает при построении обобщенных ФГКМ, в частности ФГКМ немерзлых и мерзлых массивов песчаных грунтов. Без них, как известно, невозможно принимать по данным геофизики правильные интерпретационные решения по строению, составу, свойствам и состоянию грунтов.

Прежде, чем описывать третий пример необходимо сделать небольшое пояснение.

В грунтоведении под нормативными значениями понимаются средние арифметические значения показателей свойств геологической среды, которые используются, как мера обобщения фактического материала

Таблица 2
Радиофизические свойства долеритов [29]

Долериты по показателю состояния	Средние показатели		ν , %	
	V (м/нс)	G (дБ/м)	V (м/нс)	G (дБ/м)
Талые в сезонноталом слое	$0,100\pm 0,014$	$4,73\pm 0,84$	14	42,7
Мерзлые полнокристаллические разности	$0,166\pm 0,008$	$0,96\pm 0,43$	46,4	68,7
Мерзлые разности с ксенолитами осадочных пород	$0,113\pm 0,004$	$3,04\pm 0,33$	21,2	50,6
Льдистые разности	$0,130\pm 0,008$	$2,01\pm 0,31$	7,7	55

Примечание: ν — коэффициент вариации.

Таблица 3

Радиофизические свойства осадочных пород
нижнего палеозоя [29]

Наименование породы	Средние показатели		ν , %	
	V (м/нс)	G (дБ/м)	V (м/нс)	G (дБ/м)
Верхний кембрий. Илгинская и верхоленская свита				
Мергель	0,100±0,007	4,74±0,26	18,2	41,0
Аргиллит	0,087±0,017	3,83±0,38	30,3	90,0
Алевролит	0,098±0,013	2,22±0,39	15,8	17,4
Песчаник	0,113±0,027	2,62±0,37	23,4	13,8
Нижний ордовик. Усть-кутская свита				
Доломит	0,126±0,007	2,88±0,15	17,5	38,3
Мергель	0,113±0,002	4,04±0,87	47,0	77,4
Известняк	0,120±0,003	4,54±0,13	18,0	48,7
Песчаник	0,143±0,008	1,37±0,14	23,7	12,3
Аргиллит	0,110±0,003	3,23±0,45	42,3	53,4
Алевролит	0,104±0,001	3,07±0,16	12,8	23,6
Алеврит	0,100±0,006	3,54±0,66	40,0	15,0
Уголь	0,090±0,009	5,15±0,15	50,4	36,6

Примечание: ν – коэффициент вариации.

Таблица 4

Список участков радиофизических
исследований [30]

Номер и краткая характеристика участков до глубины бурения скважин
1. Июль 2010 г. Немерзлые пески острова «Тимошка» р. Лены. Влажность песков 5-20%, температура на глубине 3,2 м около +(0,3...0,5)°C
2. Июль 2010 г. Немерзлые насыщенные водой пески на отмели острова «Тимошка». Влажность 70-80%, температура ниже 3 м +(1...7)°C
3. Июль 2010 г. Немерзло-мерзлые пески острова «Эсселях» р. Лены. Сверху до 1-2 м супеси. Влажность 20-50%, температура на 3,2 м от +0,3 до -2,4°C
4. Сентябрь 2011 г. Ст. «Н-Бестях» ж/д «Беркаит-Томмот-Якутск». Маловлажные мерзлые пески Бестяхской террасы р. Лены. Влажность не более (10-15)%, температура на 10 м чаще всего, равна -(0,1...0,3)°C
5. Октябрь 2012 г. Трасса автодороги «Виллой». Мерзлые пески Мыранновой гряды левой части долины р. Лены. Средняя влажность песков с прослоями супесей и суглинков 20-28%, температура на 10 м -(0,6...3,7)°C
6. Май 2013 г. Застройка кв. № 203 в г. Якутске на промерзающей толще намывных песков стариц р. Лены. Температура на 10 м +(0,1...1,1)°C

с целью классификации слоев геологической среды по инженерно-геологическим элементам.

В третьем примере отражены лишь некоторые результаты обобщения нормативных характеристик кинематических и динамических атрибутов электромагнитных волн, полученных в криолитозоне Якутии аппаратурой дискретной георадиолокации «17ГРЛ-1» на центральной частоте спектра излучения-приема электромагнитных волн около 30-50 МГц [29] и аппаратурой индуктивной электроразведки «СЭМЗ» на частоте 1,125 МГц [30]. На иных частотах значения скорости и затухания импульсных волн, полученные методом георадиолокации в мерзлых грунтах, могут быть иными. Однако чисто теоретически они не должны изменяться в диапазоне частот 10^6 - 10^9 Гц, который, судя по ссылке в работе М. Л. Влодова и М. С. Судаковой [6], зарубежные геофизики назвали неточным термином «георадарное плато».

В общей совокупности наиболее представительной является группа нормативных значений скорости и удельного затухания импульсных электромагнитных волн для скальных грунтов – интрузивных долеритов, которые на большой площади Западной Якутии плащеобразно покрывают комплекс разновозрастных осадочных пород Мирнинской алмазоносной провинции (табл. 2)

Долериты имеют высокую плотность (около $2,98 \text{ г/см}^3$) и намагниченность со средним значением $530 \cdot 10^{-6}$ ед. СГС. Причем, намагниченность может быть, как прямой, так и обратной. В электрическом поле долериты ведут себя, как диэлектрики с высоким удельным электрическим сопротивлением порядка 10^4 омметра. Зато их радиоактивность аномально низкая – не более 3-4 мкР/ч. Принято считать, что долериты, как магнитные образования не могут изучаться методом георадиолокации, но данные табл. 2 опровергают это необоснованное мнение. Магнетизм

долеритов не мешает получению правильных оценок их радиофизических свойств, но оказывает сильное влияние на их вариативность. В полнокристаллическом состоянии, когда магнитные свойства долеритов не ослаблены процессами выветривания, тектоники и др., коэффициент вариации скорости (V) и удельного затухания (G) самый высокий. В измененных этими процессами долеритах он ниже в 1,3-6,0 раз. Причем, в отличие от мерзлых дисперсных грунтов криолитозоны Центральной и Южной Якутии, коэффициент вариации выше не для G, а для V.

Для использования долеритов в качестве надежных грунтовых оснований инженерных сооружений лучше всего подходят наиболее прочные мерзлые полнокристаллические разности долеритов, которые по прочности равны бетону.

Статистика нормативных значений V и G широко распространенных в Мирнинской алмазоносной провинции мерзлых скальных и полускальных грунтов, представленных комплексом осадочных пород с льдистостью (3...15)% и температурой на глубине 10-18 м -(0,6...6,3)°C, приведена в табл. 3. В ряде мест разрез сложен глинистыми засоленными грунтами верхнего кембрия (илгинская или верхоленская свита). Обнажения песчаников в среднем течении р. Виллой рассматриваются, как грунты пеляткинской или катской свиты [31]. Возраст осадочных образований не оказывает заметного влияния на их радиофизические свойства. Пониженная скорость ($V=0,109 \text{ м/нс}$) и повышенное удельное затухание ($G=3,61 \text{ дБ/м}$) в этих геологических средах обусловлены глинистостью и высокой сульфатной засоленностью до 2%. При практически равных средних значениях V и G разновозрастные мергели отличаются по коэффициентам вариации. Таким же признаком обладают аргиллиты верхнего кембрия. Вариации G в этих грунтах максимальны. Разновозрастные песчаники хорошо дифференциру-

Таблица 5
Нормативные ранжированные значения
параметра k песков [30]

Номер участка	$k, м^{-1}$	
	H_z/H_r	MOD H_z и H_r
2	-1,867	-6,532
1	-1,297	-3,429
3	-1,042	-2,514
6	-1,181	-2,883
5	-1,161	-2,764
4	-0,721	-2,528

ются по V и G и более предсказуемы по коэффициенту вариации. Угольные пласты отличаются аномально низкими значениями V и аномально высокими значениями G . По ним невозможно определить в мерзлом или талом состоянии они находятся.

Нормативные значения затухания гармонических электромагнитных волн в мерзлых песках слоя годовых теплооборотов до глубины 10-15 м получены методом индукции на нескольких участках, расположенных на территории Центрально-Якутской низменности в природных условиях и на территории гидронамыва (участок № 6, табл. 4). Параметр k оценивался по отношению и модулю значений амплитуд вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_r) магнитных составляющих поля ВВМД (второй и третий столбцы табл. 5). Содержимое табл. 5 показывает, что мера относительной изменчивости параметра k мало чем отличается по отношению амплитуд и модулю H_z и H_r . Поэтому, любую из этих характеристик можно использовать при решении научно-практических задач общей и инженерной геоэкологии, а также инженерной геологии.

В ряду участков радиофизических исследований, отсортированных в порядке убывания значений электрической проводимости песков, на первом месте стоит молодой не полностью промерзший остров «Тимошка». В толще его песков, насыщенных пресной водой, затухание гармонических электромагнитных волн максимально. На последнем месте по минимуму затухания находится площадка железнодорожной станции «Нижний Бестях», основание которой сложено мало-влажными высокотемпературными мерзлыми песками Бестяхской террасы. Промежуточное положение по затуханию с почти неизменным его значением в диапазоне эффективного электросопротивления 246-569 Ом·м. занимают промерзающие пески острова «Эсселях» и пески гидронамыва в квартале № 203, а также мерзлые пески Мыранновой гряды по трассе автодороги «Виллой». В целом, в метрике нормативных значений эффективное электросопротивление, и это нужно отметить, оказывает закономерное влияние на затухание гармонической волны в толще песков разного генезиса, состава и влажностно-температурного состояния. Этот обобщенный образ связи характеристик электрических свойств дисперсных грунтов служит научным обоснованием применения технологии ЭМЗ в расширенном составе методов геоэлектрики на постоянном и переменном токе, как инструмента наземного мониторинга свойств и состояния мерзлых грунтов в освоённых и

осваиваемых районах криолитозоны Центральной Якутии. Цель такого мониторинга — ресурсосберегающей, экологически чистый контроль и прогноз тенденций тепловой динамики мерзлых песчаных оснований фундаментов зданий и сооружений в промежуточной цепочке криогенных событий между двумя крайними состояниями: мерзлым и талым.

Заключение

Научно-методические основы рассмотренной новой инновационной технологии ЭМЗ разработаны в Институте мерзлотоведения П. И. Мельникова СО РАН с целью изучения в природных условиях и на застроенных территориях мерзлых и немерзлых неоднородных и анизотропных геологических сред с неоднородностями сложной конфигурации. В частности, мерзлых грунтов слоя годовых теплооборотов криолитозоны России, вовлеченной в интенсивное промышленное освоение Северо-Восточной Сибири, Субарктики и Арктики.

В отличие от существующих за рубежом и в России наземных геофизических технологий, физическая основа технология ЭМЗ построена на изучении методами георадиолокации и индукции процесса затухания в слое годовых теплооборотов импульсных электромагнитных волн (сигналов георадиолокации) в широкой полосе высоких частот и гармонических волн (сигналов индукции) на фиксированной и тоже высокой частоте. Методическим фундаментом технологии ЭМЗ выступает новый запатентованный способ многоазовых измерений времени задержки, амплитуды сигналов георадиолокации и амплитуды сигналов индукции в некоторой окрестности точек поисково-разведочной и мониторинговой сети геолого-геофизических наблюдений.

Неоспоримым информационным предметом новизны технологии ЭМЗ предстает со стороны структурной геологии динамическое преобразование радарограмм, а со стороны петрофизики, вычисляемые по параметру амплитудного затухания сигналов георадиолокации и индукции, средние значения в слое годовых теплооборотов основных в строительном отношении показателей свойств мерзлых грунтов: температуры, льдистости, засоленности, теплоемкости и прочности.

Многолетняя научно-производственная апробация технология ЭМЗ, сделанная в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока на территории Республики Саха (Якутия), Забайкальского края и Амурской области [2], убедительно свидетельствует о приемлемой точности и достоверности результатов количественной оценки теплового состояния и свойств мерзлых грунтов. При 36 измерениях трасс сигналов георадиолокации и 8 измерениях сигналов индукции встречной и обратной установками абсолютная погрешность количественной оценки по параметру затухания сигналов средней температуры мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов в 77% случаев равна $\pm 0,6^\circ\text{C}$. При этом картина динамики трендов поведения температурных полей в этом слое на площадных и линейных инженерных сооружениях полностью

воспроизводится по данным технологии ЭМЗ и полупроводниковой термометрии скважин.

С приемлемой точностью, как и температура количественно оцениваются показатели свойств мерзлых грунтов. В подавляющем большинстве случаев их средние (нормативные) значения оцениваются с относительной погрешностью не более 10-20%.

Список использованных источников

- Патент 2490671 RU, МПК G01V 3/12, G01S1 3/88. Способ георадиолокации многолетнемерзлых пород/Л. Г. Нерадовский; заяв. Л. Г. Нерадовский. № 2011125238/28; заяв. 17.06.2011; опубл. 20.08.2013. Бюллетень № 23. 11 с.
- Л. Г. Нерадовский. Научно-методические основы изучения мерзлых грунтов слоя годовых теплооборотов методами электромагнитных зондирования: дис. ... д-ра техн. наук. Якутск, 2016. 378 с.
- Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий РФ. Указ Президента РФ от 07.07.11 г. № 899. ИА «ГАРАНТ»: информационно-правовой портал. <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/55071684/#ixzz2zc2M1y33>.
- Ю. Д. Зыков. Геофизические методы исследования криолитозоны: учебник. М.: МГУ, 2007. 272 с.
- Рекомендации по определению физико-механических свойств мерзлых грунтов геофизическими методами. ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1989. 56 с.
- М. Л. Владов, М. С. Судакова. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. М.: Геос, 2017. 240 с.
- Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения (г. Магадан, Россия, 5-8 сентября 2017 г.). Тезисы докладов/Отв. ред. Р. В. Чжан. Якутск: ФГБУН Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2017. 380 с.
- В. П. Мельников, В. Б. Геннадиник. Криософия — онтология холодной материи//Вестник Тюменского государственного университета. 2012. № 2. С. 6-14.
- В. П. Мельников, В. Б. Геннадиник, А. В. Брушков. Аспекты криософии: криоразнообразие в природе//Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. № 2. С. 3-11.
- А. Т. Акимов, Т. М. Клишес, В. П. Мельников, А. М. Снегирев. Электромагнитные методы исследований криолитозоны/Под ред. В. Д. Бадалова. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1988. 48 с.
- Г. В. Геннадиник. Геофизические исследования мерзлых горных пород и льдов: Указатель литературы (1930-1985 гг.)/Сост., под ред. Б. И. Геннадиника. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1986. 134 с.
- А. П. Зарубин. Отечественная библиография 1990-2018 гг. Под-поверхностное зондирование. Электронные текстовые данные. <http://www.prometeus.nsc.ru/partner/zarubin/sonde2.ssi>.
- G. R. Olhoef (1978). Electrical properties of permafrost//Third International conference on permafrost. Proceedings. Vol. 1. P. 128-131.
- M. K. Seguin (1978). Temperature-electrical resistivity relationship in continuous permafrost at putnig, ungava peninsula//Third International conference on permafrost. Proceedings. Vol. 1. P. 137-144.
- A. G. Lewkowicz, B. Etzelmüller, S. L. Smith (2011). Characteristics of Discontinuous Permafrost based on Ground Temperature Measurements and Electrical Resistivity Tomography, Southern Yukon, Canada//Permafrost and periglacial processes. Vol. 22. Issue 4. October 2011. P. 320-342.
- Christian Hauck (2013). New Concepts in Geophysical Surveying and Data Interpretation for Permafrost Terrain//Transactions of the International Permafrost Association. Vol. 24. Issue 2. P. 131-137.
- Л. Г. Нерадовский. Методическое руководство по изучению многолетнемерзлых пород методом динамической георадиолокации. М.: РАН, 2009. 337 с. (Серия «Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий: ежегод. изд. МСНТ; гл. ред. Н. П. Ершов».)
- В. Ф. Лебедев, В. И. Онущенко, Л. М. Литвинцева. Комплекс СЭМЗ. Методическое пособие. Красноярск: НПО «Сибцветметавтоматика», 1991. 60 с.
- Комплекс СЭМЗ (среднечастотного электромагнитного зондирования). Техническое описание. Красноярск: НПО «Сибцветметавтоматика», 1991. 30 с.
- В. И. Иголкин, Г. Я. Шайдулов, О. А. Тронин, М. Ф. Хохлов. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе. Красноярск: СФУ, 2016. 272 с.
- А. В. Омеляненко. Георадиолокация мерзлых рыхлых отложений: дисс. ... к. т. н.: 04.00.12. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 1989. 194 с.
- М. И. Финкельштейн, В. А. Кутев, В. П. Золотарев. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии/Под ред. М. И. Финкельштейна. М.: Недра, 1986. 128 с.
- Л. А. Суханов. Измерение мощности горных ледников радиолокационным методом//Материалы гляциологических исследований. Хроника. Обсуждения. Вып. 22. М.: Институт географии АН СССР, 1973. С. 58-64.
- В. В. Богородский. Радиозондирование льда. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 63 с.
- Л. Г. Нерадовский. Применение радиолокации при картировании таликов в окрестностях Якутска//Третья республиканская конференция по повышению научно-технического уровня изысканий в строительстве. Тезисы докладов. Якутск, 1989. С. 77-78.
- П. Н. Александров. Теоретические основы георадарного метода. М.: Физматлит, 2017. 120 с.
- Материалы Международной научно-практической конференции «Георадар-2017» 27-29 сентября 2017 г. Тезисы докладов. М.: МГУ, 2017. С. 8. <http://www.georadarconf.ru>.
- Д. М. Шестернев, Л. Г. Нерадовский, А. В. Литовко. Изучение методом индукции теплового состояния основания автодороги федерального значения «Амур» (Чита-Хабаровск)//Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 2. С. 100-111.
- Л. Г. Нерадовский. Волновые характеристики многолетнемерзлых пород Западной Якутии//Материалы IV конференции геокологов России. МГУ им. М. В. Ломоносова, 7-9 июня 2011 г. Т. 1. Ч. 2. Геофизические исследования в криолитозоне. М.: Университетская книга, 2011. С. 208-215.
- Л. Г. Нерадовский, Д. М. Шестернев, А. А. Литовко, А. Н. Федоров, П. Я. Константинов. Нормативные показатели и связь характеристик электрических свойств песков криолитозоны Якутии//Сергиевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. Вып. 18. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (24-25 марта 2016 г.). М.: РУДН, 2016. С. 555-560.
- И. С. Рожков, Г. П. Михалев, Б. И. Прокопчук, Э. А. Шамшина. Алмазные россыпи Западной Якутии. М.: Наука, 1967. 271 с.

The technology of studying the frozen soil of the Russia permafrost zone by the electromagnetic fields attenuation

L. G. Neradovskii, doctor of engineering, senior researcher, Melnikov permafrost institute, Siberian branch, Russian academy of sciences, Yakutsk, Russia.

The article considers the scientific and methodical bases of new innovative geophysical technology, consisting of two ground-based geoelectric methods: georadiolocation and inductive electromagnetic sensing. The technology is focused on a comprehensive studying in natural conditions and in pick-up areas of heterogeneous anisotropic permafrost soils, which constitute the most important layer of annual heat flows in the field of mechanical, thermal and other interaction with the foundations of engineering structures. The physical basis of the technology is the spatiotemporal dependence of the velocity of propagation and attenuation of pulsed and harmonic electromagnetic waves on the structure, composition, properties and state of frozen soils. However, the main attention in the technology is focused on studying the attenuation parameter of the wave amplitude that is the most informative and sensitive to changes in the entire internal appearance of the soil environment. The methodic basis of the technology is a patented new method of reusable measurements of signals of georadiolocation and induction with change of position and azimuth of radiating and receiving antenna of georadars and equipment of inductive geoelectrics in the vicinity of points of exploration and monitoring network of geological and geophysical observations. At 36 measurements of signals of georadiolocation and 8 measurements of signals of induction by direct and counter installations the relative error of calculation of average values of speed, specific layer-by-layer attenuation and parameter of amplitude attenuation of waves in all layer of annual heat turns does not exceed 10%. This level of accuracy is quite acceptable for solving a wide range of problems related to the scientific and practical studying frozen soils in order to ensure information security of cryogenic Russia. Engineering-geological efficiency of the technology is illustrated by several typical examples with a lengthy presentation of the results of electromagnetic sounding in three key areas: the study of the structure, petrophysics and Radiophysics of frozen soils.

Keywords: innovation, technology, frozen soils, layer of annual heat flows, electromagnetic waves, signals of georadiolocation and induction, attenuation.