

ОПЫТ КОМПЛЕКСНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ИНЪЕКЦИОННОГО ЛЬДА

Л. Г. НЕРАДОВСКИЙ

Старший научный сотрудник лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, к.т.н.

leoner@mpi.ysn.ru

И. И. СЫРОМЯТНИКОВ

Младший научный сотрудник лаборатории региональной геокриологии и криолитологии Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск

А. А. УРБАН

Инженер-исследователь лаборатории региональной геокриологии и криолитологии Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск

ankaurban@mail.ru

В. П. МЕЛЬЧИНОВ

Заведующий кафедрой радиотехники Северо-Восточного Федерального Университета им. М.К. Аммосова, г. Якутск, к.ф.-м.н.

melchvp@sitc.ru

Аннотация

Описаны результаты комплексного изучения строения многолетнего бугра пучения – булгунняхы и условий залегания в нём линзы подземного льда инъекционного генезиса методами бурения и термометрии скважины совместно с методами геофизики. Для условий г. Якутска показана эффективность картирования границ линзы льда в горизонтальном направлении и по глубине по коэффициентам затухания амплитуды импульсной и индуктивной электромагнитной волны с использованием программ цифровой обработки сигналов георадиолокации “Signal” и “GeoScan32”

Ключевые слова

Скважина, георадиолокация, радарограмма, булгуннях, лёд, волновые характеристики, коэффициенты затухания

Введение

Картирование границ распространения подземных льдов в плане и по глубине является одной из главных и сложных научно-производственных задач. От знания и умения решать эту задачу в немалой степени зависит качество проектно-изыскательских работ и, в конечном итоге, надёжность и устойчивость эксплуатации инженерных сооружений, построенных по I принципу строительства с сохранением в основании многолетнемёрзлых пород. В отличие от захороненных под толщей наносных образований древних подземных льдов пластового и повторно-жильного генезиса, инъекционные льды в силу специфики своего образования отчётливо проявляют в рельефе место своего расположения в виде многолетних бугров пучения – булгунняхов. Эти криогенные образования заведомо непригодны для любого вида строительства и поэтому их изучение представляет чисто научный интерес. Во-первых, с точки зрения решения частных методических вопросов, связанных с изучением условий залегания в массивах многолетнемёрзлых пород (ММП) высокоомных локальных неоднородностей, каковыми являются линзы инъекционных льдов. Во-вторых, изучения мониторинговых возможностей наземных геофизических методов в оценке изменения состояния подземных льдов любого генезиса. Один из таких опытов с применением методов импульсной и индуктивной электроразведки

рассматривается в настоящей статье на примере научно-исследовательских работ, выполненных в 2009-2011 гг. Институтом мерзлотоведения им. П. И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН совместно с Северо-Восточным Федеральным Университетом (СВФУ) им. М. К. Аммосова.

Объект исследований

Объектом исследований являлся один из булгунняхов г. Якутска – бугор многолетнего пучения, а предметом исследований – границы распространения и условия залегания в нём линзы подземного льда инъекционного происхождения.

Булгунняхы, как одна из форм мерзлотных явлений и процессов, встречаются во всех географических зонах Якутии, но в г. Якутске и его окрестностях, занимающих обширную долину р. Лены “Туймаада” между Табагинским и Кангаласским мысами, они встречаются редко [6]. В соответствии с теоретическими представлениями механизм образования булгунняхов связан с особенностями гидрогеологического режима областей развития мерзлых толщ и внедрением под напором в промерзающие или уже мерзлые горные породы подземных вод или плавунных водно-грунтовых масс [1]. Этот процесс происходит при всестороннем промерзании талых пород, находящихся под дном высыхающих озерных котловин. В результате разнонаправленных потоков холода возникает замкнутый со всех сторон объем талых водоносных отложений, постоянно сокращающийся в размерах. Линза воды может существовать на протяжении всего периода существования булгунняху, постепенно наращивая ледяное ядро, которое может достигнуть мощности 10 м и более. При этом оно имеет линзовидную форму в разрезе и по площади.

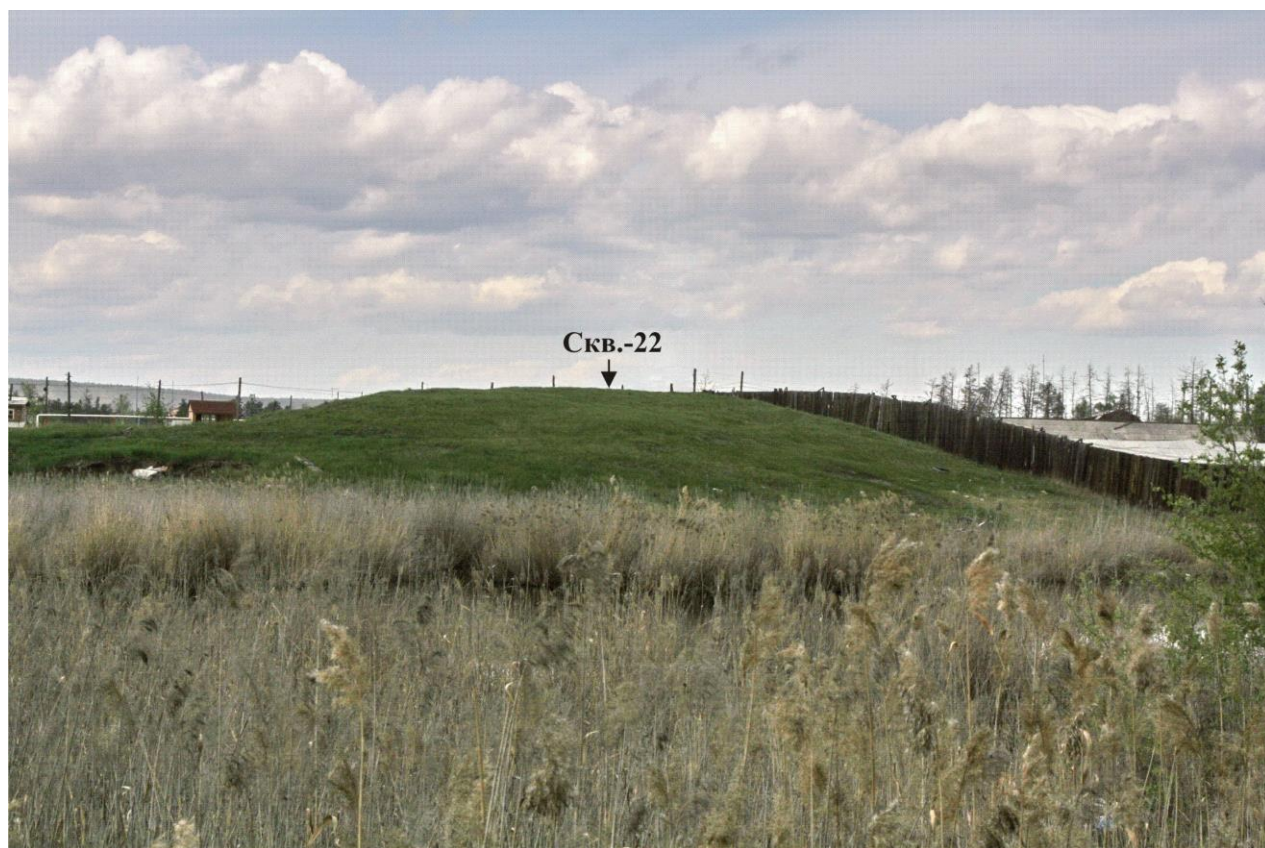


Рис. 1. Вид на булгуннях с южной стороны в летний период года. На вершине показана точка бурения опорной скважины №22

Изученный булгуннях находится в районе ИМЗ СО РАН и занимает первую надпойменную террасу р. Лены с абсолютными отметками рельефа 93-97 м. Общий вид булгунняху и окружающего его ландшафта показан вместе с точкой бурения скважины №22 на рис. 1. Максимальная высота булгунняху в центральной части, где пробурена скважина, равна 5 м.

Диаметр бугра в основании составляет около 80 м. С запада и востока бугор окружают мелководные заболоченные старицы р. Лены. Поверхность бугра лишена растительности, а его почвенный слой нарушен старыми и новыми неглубокими выемками глинистого грунта, используемого местным населением в качестве строительного материала. Подножье булгунняха завалено бытовым мусором.

Булгуннях на территории ИМЗ СО РАН изучали в разные годы. Начало было положено в ноябре 1936 г., когда Г. О. Лукин и П. А. Соловьёв пробурили на вершине булгунняха скважину глубиной 12 м с целью изучения литологического состава и организации температурных наблюдений. Бурение также проводилось в 1937–1938 гг., 1947, 1955–1962 гг. За этот период времени П. А. Соловьёвым, В. В. Куницким и Н. К. Мишариной под руководством Н. А. Граве были собраны и систематизированы данные по температурному режиму булгунняха в годовом цикле [2].

По данным бурения в марте 2009 г. одной из опорных скважин сети геокриологического мониторинга г. Якутска разрез булгунняха сложен мёрзлыми озёрно-аллювиальными отложениями дриас-голоценового возраста [3]. Для лучшего понимания строения булгунняха в табл. 1 приводится описание разреза опорной скважины №22. Мощность толщи аллювиальных отложений бурением не установлена, но в пределах первой надпойменной террасы она составляет 20-25 м.

Табл. 1.

Описание криолитологического разреза скважины №22. (Дата бурения 30 марта 2010 г.)

Глубина, м	Описание разреза
0,00-0,08	Почвенно-растительный слой с супесью светло-коричневого цвета
0,08-0,68	Супесь коричневого цвета частично заторфованная. Торф в виде отдельных блоков с разной степенью разложения. Грунт сильно мёрзлый с массивной криогенной текстурой
0,68-7,05	Суглинок тёмно-серого (сизого) цвета, заиленный, заторфованный, твердомерзлый, сильно льдистый с мелко- и средне слоистой волнистой криогенной текстурой. Шлиры льда до 2-2,5 мм, редко - 6-8 мм. При оттаивании текучей консистенции со стойким болотным запахом. В интервалах 1,05-1,12; 2,45-2,56; 3,03-3,24 м – прослой торфа темно-коричневого цвета массивной криогенной текстуры. На 5,30-5,42 м торф тёмно-желтого цвета средней степени разложения. В интервале 5,45-5,70 м наблюдается резкое увеличение льдистости грунта до категории льдогрунта. На 5,70-7,05 м криогенная текстура средне-крупно слоистая со шлирами льда до 12-15 мм. Чередование слоев суглинка с крупными и средними шлирами от 4-6 до 8-10 см.
7,05-7,5	Лёд матового цвета с микро горизонтальными трещинами. С вмещающими суглинками контакт четкий (рис. 2).
7,5-8,9	Льдогрунт с линзами прозрачного льда (обломки заторфованного суглинка среди льда).
8,9 –9,2	Песок мелкозернистый тёмно-серого цвета, твердомерзлый с массивной криогенной текстурой.
9,2–10,2	Суглинок тёмно-серый, заиленный. Льдогрунт.
10,2-11,4	Песок мелкозернистый тёмно-серого цвета с прослоями (25-30 мм) детрита чёрного цвета, твердомерзлый с тонкослоистой криогенной текстурой.
11,4-13,8	Песок мелкозернистый тёмно-серого цвета с большим количеством детрита черного цвета (многочисленные тонкие разнонаправленные прослой равномерно по всему слою). Грунт твердомерзлый с массивной криогенной текстурой.
13,8-15,2	Песок мелкозернистый светло-серого цвета без детрита. Грунт твердомерзлый с массивной криогенной текстурой.

По описанию керна скважины линза инъекционного льда (рис. 2) имеет небольшую мощность. Она залегает на глубине 7,05-7,50 м среди сильнольdistых глинистых отложений с показателем объёмной льdistости более 60%. По этому критерию верхняя граница зоны льдонасыщения залегает примерно на глубине 3 м. Точное положение этой границы установить затруднительно из-за неравномерного распределения по глубине линзочек и прослоек сегрегационного (шлирового) льда. Нижняя граница основной зоны льдонасыщения контролируется сменой литологии отложений и проходит по границе суглинков и мелкозернистых песков на глубине 10,2 м. Отличительной особенностью мёрзлых глинисто-песчаных отложений, среди которых залегает линза льда, является сочетание высокой льdistости и обилия веществ органического (торфы, илы) и растительного происхождения (детриты).



Рис. 2. Образец линзы инъекционного льда. КERN скважины №22 на интервале бурения 7,3-7,5 м

На момент бурения скважины булгуннях до изученной глубины 15,2 м находился в мёрзлом состоянии. По данным термометрии скважины №22 среднегодовая температура на глубине 10-15 м составляла в 2009 г. минус (2,6-2,4)°C. По данным систематизации прошлых лет (1955-1962 гг.) температурный режим отложений булгуннях на этой глубине был более холодным – минус (3,2-3,7°C). По показателю стабилизации значений температуры и затуханию амплитуды колебаний температуры в годовом цикле в пределах погрешности полевых измерений нижняя граница слоя годовых теплооборотов (СГТ) в булгуннях находится на глубине 13 м.

Методика полевых исследований

Исследования выполнялись весной 2010 г. методом георадиолокации и методом дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП) совместно с кафедрой радиотехники СВФУ им. М. К. Аммосова. Полученные результаты привязаны к данным бурения и термометрии опорной скважины №22. Метод георадиолокации имел цель изучить структуру булгунняха и условия залегания в нём инъекционного льда. Методу ДЭМП отводилась вспомогательная роль – проследить в плане границы распространения зоны льдонасыщения в булгунняхе. Запись сигналов георадиолокации и измерение сигналов ДЭМП производились по линии профиля, пересекающего булгуннях с востока на запад. Начало профиля находилось на заснеженной поверхности старичного озера, а конец – у подножья булгунняха заваленного металлоломом. Длина профиля 100 м.

Метод георадиолокации. Непрерывная запись сигналов георадиолокации осуществлялась георадаром “ОКО-2” с антенным модулем АБ-250, работающего на центральной частоте спектра излучения и приёма электромагнитных волн 250 МГц. Плотность записи сигналов по дистанции 5 трасс/метр. Расстояние между записанными трассами сигналов 0,28 м. Дискретность записи сигналов по времени задержки 0,39 нс. Длительность записи сигналов до 200 нс.

Метод ДЭМП. Этот широко распространённый в инженерной геофизике и геофизике криолитозоны метод малоглубинной индуктивной электроразведки выполнялся уникальной по своим технико-эксплуатационным характеристикам аппаратурой “СЭМЗ”. Она изготавливалась в 90-х годах прошлого столетия в НПО “Сибцветметавтоматика” (г. Красноярск) и до сих пор морально не устарела. С помощью, входящих в комплект аппаратуры, кольцевых приёмно-передающих антенн диаметром 0,3 м, измерялась вертикальная составляющая вектора магнитной индукции (H_z). Использовалась схема вертикальной поляризации электромагнитного поля (ЭМП) на частоте 1,125 МГц. Передающая антенна (ПРД) и приёмная антенна (ПРМ) не устанавливались на треногах с угломерными устройствами, а переносились оператором и техником-записчиком на высоте 0,7 м над поверхностью Земли. Принимая во внимание данные бурения о неоднородном строении булгунняха со сложным характером изменчивости льдистости отложений, было принято решение проводить измерения по методике встречных установок на 2-х разносах. В прямой установке антенна ПРД устанавливалась в начальной точке профиля, а антенна ПРМ удалялась от неё на запад на расстояние (разнос) 10, 20 м. В обратной установке антенны менялись местами. Результат измерений относился к середине установок. По окончании измерений прямая установка перемещалась на следующую точку профиля. Расстояние между точками ДЭМП было принято равным 1 м.

Выбор разносов установки ДЭМП сделан исходя из 2-х соображений. С одной стороны нужно было достичь глубины проникновения ЭМП до линзы льда, залегающей на глубине 7,05-7,50 м, а с другой стороны требовалось уменьшить влияние рельефа на результаты ДЭМП в центральной части булгунняха. Речь идёт о том, чтобы антенны в процессе профилирования всегда находились на расстоянии прямой видимости и не были скрыты друг от друга вершиной булгунняха.

Из опыта работ методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) известно, что мёрзлые и тем более, льдистые озёрно-аллювиальные отложения долины р. Лены в районе г. Якутска имеют средний показатель удельного электрического сопротивления (УЭС) не менее 1000 ом.м. При таком УЭС геоэлектрического разреза, заданных значениях максимального разноса установки ДЭМП и частоты излучения антенны ПРД, глубина эффективного проникновения ЭМП в булгуннях оценивается не менее 9 м.

Таким образом, выбранные параметры установки ДЭМП и шаг профилирования позволили детально изучить по линии профиля изменения степени льдистости глинисто-песчаных отложений и выделить в них границы линзы инъекционного льда.

Методика цифровой обработки

Обработка выполнялась в несколько этапов.

На первом этапе обрабатывались данные метода ДЭМП с целью вычисления значений коэффициента кажущегося удельного затухания в булгуннях, амплитуды индуктивной электромагнитной волны (ЭМВ) до оценочной глубины 9 м. Вычисления коэффициента выполнялись по формуле:

$$k_1 = (20 \log(A_2 / A_1)) / (r_2 - r_1), \quad (1)$$

где, k_1 – среднее значение коэффициента в дБ/м по данным прямой и встречной установок метода ДЭМП; A_1 и A_2 – амплитуды H_z на разносах 10 и 20 м в микровольтах; r_1 и r_2 – значения разносов 10 и 20 м.

На втором этапе обрабатывались данные метода георадиолокации. Цель обработки – определить по слоям разреза булгуннях удельные волновые характеристики (скорость распространения и затухание амплитуды импульсной ЭМВ¹). Для этого сначала с помощью программы “Signal”² производился разведочный параметрический анализ волновой структуры фрагмента радарограммы длиной 10 м, вырезанного в окрестности скважины №22. Далее, по найденной средней скорости распространения в булгуннях ЭМВ (0,146 м/нс) было вычислено значение вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости ($\epsilon=4,2$). Формула вычисления этой электрофизической характеристики широко известна среди специалистов занимающихся георадиолокацией и в статье не приводится. Завершался второй этап обработки вводом значения $\epsilon=4,2$ в программу “GeoScan32” и построением радарограммы в масштабе глубины³.

На третьем этапе обработки продолжалась обработка данных георадиолокации с целью определения средних значений коэффициента (k_2) относительного затухания импульсной ЭМВ (сигналов георадиолокации) в булгуннях до глубины 9 м. В линейном варианте использовалась методика сбора и накопления первичной информации (трасс сигналов георадиолокации) в некоторой окрестности точек поисково-мониторинговой сети геолого-геофизических наблюдений [5].

Перед вычислением коэффициента k_2 радарограмма обрезалась снизу до времени задержки 120 нс, что при средней скорости 0,146 м/нс соответствовало средней глубине зондирования до 9 м. Тем самым, данные метода ДЭМП и георадиолокации были приведены к одной сопоставительной глубине изучения булгуннях. После этого радарограмма разрезалась по дистанции на последовательные смежные фрагменты длиной по 2 м. По каждому фрагменту, состоящему из 7-8 трасс сигналов георадиолокации, выполнялись следующие подготовительные операции:

- 1) удаление из трасс сигналов избыточной информации – импульсов с отрицательными значениями амплитуд;
- 2) выборка импульсов, выразительных по амплитуде и разрешённых по фазе;
- 3) преобразование положительных амплитуд импульсов из дискретного масштаба в децибелный масштаб записи;
- 4) аппроксимация степенной функцией поля рассеяния выборочной совокупности импульсов.

За эмпирическую оценку неизвестных истинных значений коэффициента k_2 принимались значения показателя степенной функции, устойчиво и адекватно описывающей в сглаженном виде

¹ В дальнейшем, скорость и затухание.

² Алгоритм программы разработан Л. Г. Нерадовским для обработки сигналов дискретной георадиолокации, зарегистрированных в окрестности точек скважин или топографических пикетов с изменением положения и ориентации антенн георадара и подробно описан в его диссертационной работе [4].

³ Программа “GeoScan32” является программным продуктом ООО “ЛОГИС” и поставляется заказчику вместе с георадарами серии “ОКО-2”. Для преобразования радарограмм из временного масштаба в масштаб глубины, программа требует ввода диэлектрической проницаемости для всего исследуемого массива горных пород или грунтов, или отдельных его слоёв.

закономерное нелинейное затухание импульсной ЭМВ в неоднородном и анизотропном по строению и свойствам массиве мёрзлых отложений с включением линзы инъекционного льда.

На четвёртом этапе завершалась обработка данных георадиолокации с использованием всего спектра возможностей программы “GeoScan32” на достижение конечной цели – обнаружения в разрезе ледяного ядра булгунняха и условий его залегания во вмещающих озёрно-аллювиальных отложениях. Цель удалось достигнуть в ходе интерактивного перебора нескольких сценариев состоящих из различного числа и последовательности модулей обработки. Среди модулей главную роль играли модули синтеза апертуры и выделения контура. Причём объектом цифровых преобразований служила не вся радарограмма, а только её часть длиной 27 м, ограниченная вершиной булгунняха в пределах которой по аномалиям относительно низкого затухания индуктивной и импульсной ЭМВ было принято решение о наиболее вероятном присутствии на этом участке линзы инъекционного льда.

Обсуждение результатов

Обсуждение полученных результатов начнём с рис. 3. Он важен тем, что иллюстрирует эффективность комплексного геолого-геофизического подхода в решении одной из сложных поисковых задач георадиолокации, а именно, обнаружения в разрезе местоположения локальной неоднородности. В данном случае она представлена простой по форме маломощной линзой инъекционного льда в “рубашке” из льдистых отложений. Всё вместе составляет неразделимую по электрофизическим и волновым характеристикам единую макро неоднородность – зону льдонасыщения булгунняха. Если ограничиться визуальным анализом радарограммы (рис. 3, б) в контексте полученных результатов, то присутствие зоны льдонасыщения в разрезе проявляет себя участком волновой картины с высокими отражающими свойствами в виде тёмной вертикальной полосы. Есть ещё одна возможность удостовериться о наличии в разрезе неоднородности с низкой электропроводностью. Это – детальный послойный анализ нормированных спектров ЭМВ. Например, на участке зоны льдонасыщения, спектр имеет один чётко выраженный максимум на частоте около 200 МГц. Вне зоны льдонасыщения максимальная часть спектра распадается на несколько составляющих и смещается в область частот до 70-100 МГц. Однако преобразование радарограмм в значения максимумов спектра трудно формализовать в алгоритмическую процедуру, не требующую вмешательства человека и, возможно, поэтому эта операция не автоматизирована. Проще воспользоваться иным способом, хотя он тоже не автоматизирован, но легко реализуется и даёт достоверную информацию о границах распространения зоны льдонасыщения по линии профиля. Эффективность применения этого способа видна из сравнения графиков коэффициентов удельного (k_1) и относительного затухания (k_2) амплитуды индуктивной (сигналы ДЭМП) и импульсной (сигналы георадиолокации) ЭМВ в булгунняхе до глубины 9 м (рис. 3, а). Графики различны в деталях, но свидетельствуют об одной и той же пространственной закономерности: в зоне льдонасыщения происходит аномальное уменьшение затухания ЭМВ. В этом и состоит доказательство достоверности фиксации по данным геофизики границ зоны льдонасыщения по горизонтали. Вместе с данными бурения опорной скважины №22 эти данные в виде контуров прямоугольников оконтуривают границы зоны льдонасыщения в разрезе. Однако прежде, чем получить такую информацию, нужно было определить волновые характеристики отложений, слагающих булгуннях. Эта операция сложна тем, что заранее неизвестен закон изменения диэлектрической проницаемости и электропроводности по глубине разреза. Эти изменения в случаях тонкослоистых разрезов мёрзлых речных или озёрных отложений носят сложный и непредсказуемый характер. Поэтому перед исследователем-геофизиком зачастую возникает неопределённость в ответе на вопрос, какие из границ разреза скважин являются отражающими?

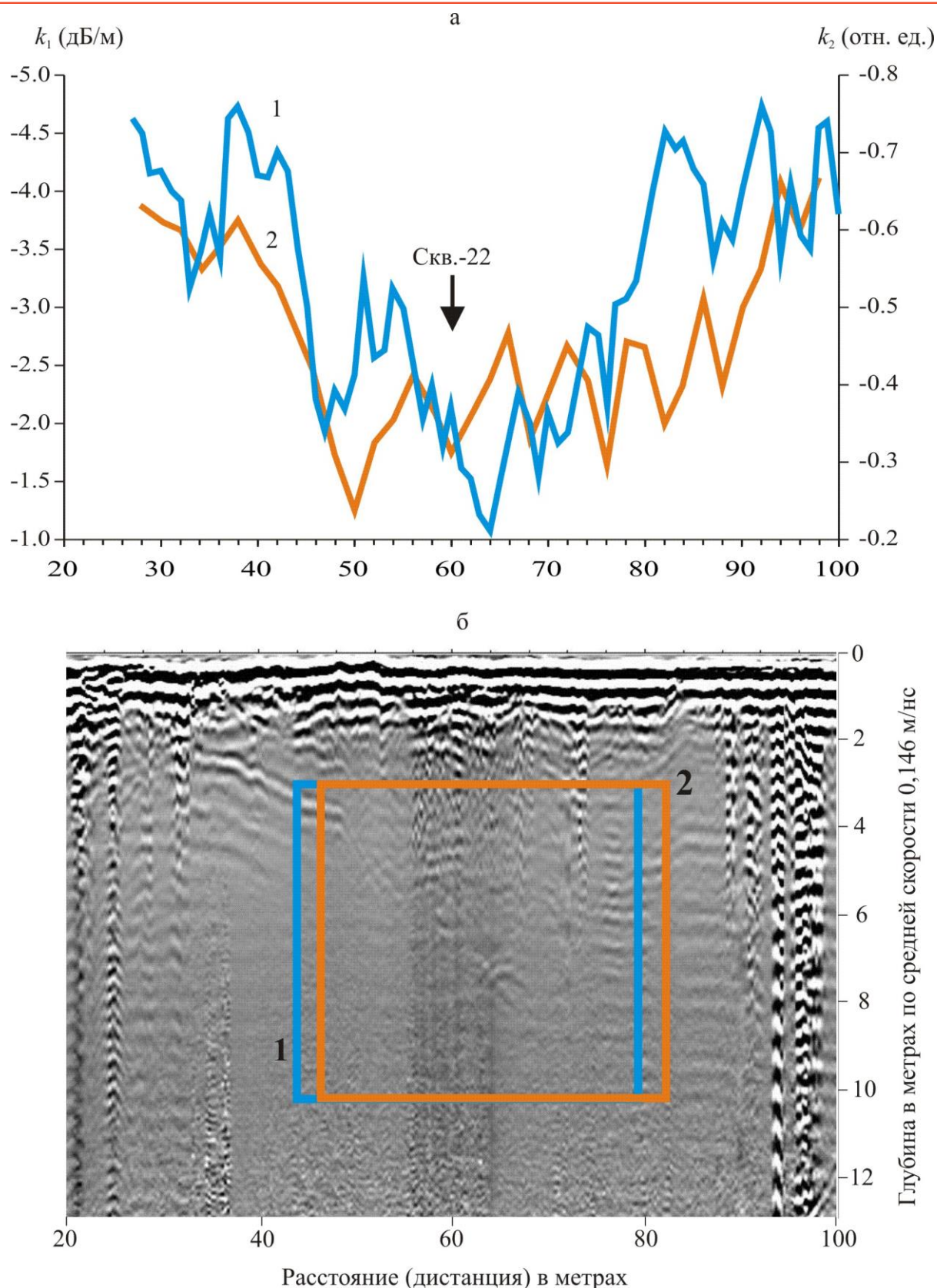


Рис. 3. Графики затухания индуктивной и импульсной электромагнитной волны в озёрно-аллювиальных отложениях булгунняха до глубины 9 м (а) и фрагмент радарограммы на участке профиля, пересекающего вершину булгунняха (б): 1–метод ДЭМП (k_1); 2–метод георадиолокации (k_2)

В случае использования единичных записей сигналов георадиолокации ответ на этот вопрос будет всегда неоднозначным. Это видно из результатов сравнения записей трасс сигналов в

окрестности точки скважины №22 (рис. 4, в). Все они различаются по числу отражений и их амплитудно-фазовым параметрам, носящим случайный характер. Лишь переход к обобщённым параметрам в виде координат когерентных и частично когерентных импульсов (рис. 4, г) приводит к устойчивым интерпретационным решениям. Причём, эта задача проще и корректнее решается программой “Signal”, которая выполняет вероятностное суммирование совокупности зарегистрированных в сигналах импульсов в ячейках амплитудно-фазовой плоскости. Работа программы “GeoScan32”, выполняющей *арифметическое* суммирование трасс сигналов георадиолокации, что *в принципе недопустимо для их стохастической природы*, приводит к появлению ложных отражений, не имеющих никакого отношения к границам разреза скважины. Есть неопознанные отражения и в результате работы программы “Signal”, но их немного – всего два. Несмотря на эту разницу обе программы выделяют в разрезе слой с минимальным удельным затуханием синтетической ЭМВ (обобщённого сигнала георадиолокации). Этот слой и является зоной льдонасыщения булгуниах.

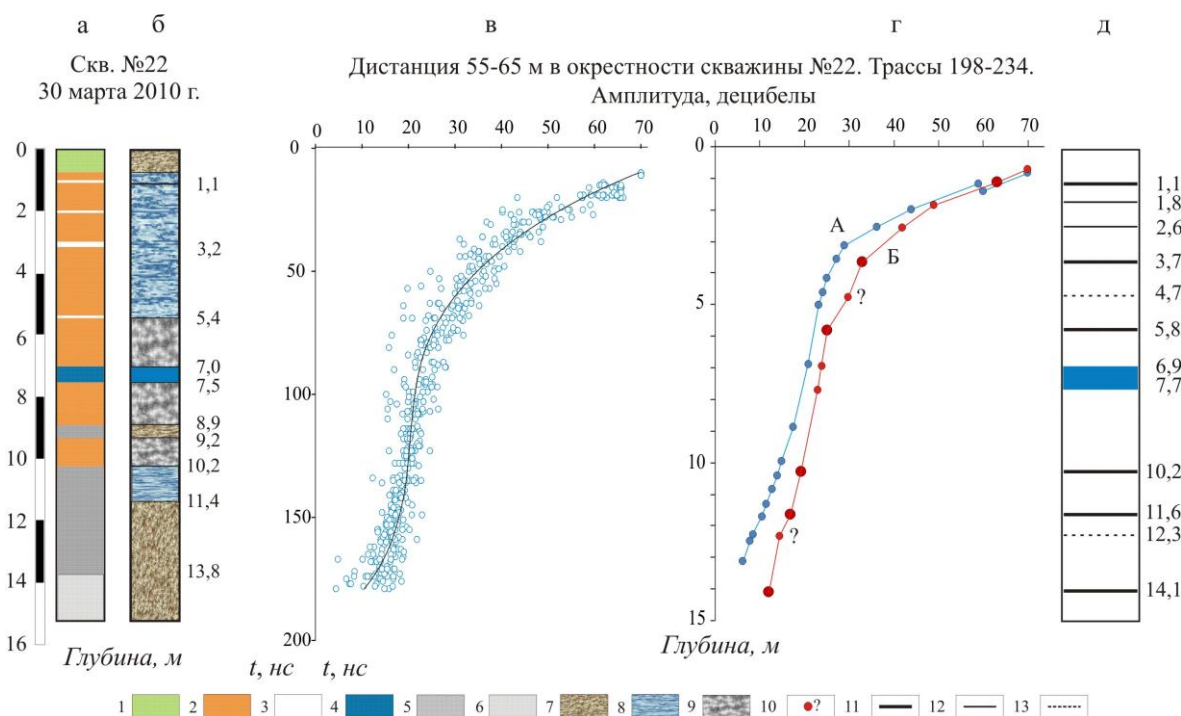


Рис. 4. Результаты параметрического георадиолокационного зондирования в окрестности опорной скважины: а – колонка разреза скважины по литологическому составу; б – тоже, по типу криогенных текстур; в – график поля рассеяния совокупности импульсов, зарегистрированных в окрестности точки скважины; г – обобщённые графики затухания амплитуд импульсов (А – по программе “GeoScan32”, Б – по программе “Signal”); д – колонка глубины залегания границ разреза по данным георадиолокации. Условные обозначения: 1-супесь; 2-суглинок; 3-прослой торфов; 4-линза инъекционного льда; 5-пески с растительными и органическими веществами; 6-пески без органики и растительных веществ; 7-мёрзлые отложения с массивной криогенной текстурой; 8-льдистые отложения с тонкослоистой криогенной текстурой; 9-сильнольдистые отложения с крупнослоистой криогенной текстурой (льдогрунты); 10-неопознанные импульсы в разрезе скважины; 11-границы когерентных отражений; 12-границы частично когерентных отражений; 13-предполагаемые границы в окрестности точки скважины

По данным параметрического зондирования георадиолокационный разрез состоит из шести слоёв, образующих опорный каркас литолого-геокриологических границ в окрестности скважины №22:

1 слой – деятельный слой, сложенный заиленными и заторфованными супесями и суглинками. В его границах происходит сезонное оттаивание мёрзлых отложений. Мощность слоя

1,12 м. В этом слое формируется зондирующий импульс с начальной амплитудой 70 дБ⁴. Импульс, отражённый от нижней границы слоя, фиксируется на времени задержки 15 нс⁵ с амплитудой 63 дБ. Сильное охлаждение с поверхности низкими температурами зимне-весеннего воздуха и высокое содержание органических веществ в этом слое обуславливают редкое сочетание значений волновых характеристик: высокую скорость (0,149 м/нс) и высокое затухание (6,25 дБ/м);

2 слой – суглинок, заиленный и заторфованный с прослоями торфа. Мощность 2,1 м. Нижняя граница на глубине 3,24 м. Когерентный импульс приходит от неё с задержкой 50 нс и амплитудой 33 дБ. Скорость в слое понижена (0,121 м/нс), а затухание за счёт наличия слабодистых торфов с массивной криогенной текстурой имеет аномальный уровень (14,2 дБ/м). Два частично когерентных импульса на времени задержки 25 и 35 нс с амплитудой 49 и 42 дБ, являются отражениями от какой-либо границы (верхней или нижней) прослоев торфов;

3 слой – суглинок слоистой криогенной текстуры с тёмно-жёлтым прослоем торфа мощностью 0,12 м на нижней границе. Мощность 2,21 м. Нижняя граница залегает на 5,4 м. Когерентный импульс приходит от неё с задержкой 80 нс и амплитудой 25 дБ. Скорость в слое 0,147 м/нс, затухание 3,62 дБ/м. Частично когерентный импульс на времени задержки 65 нс с амплитудой 30 дБ, есть отражение от неизвестной границы, которая в точке бурения скважины не обнаружена, но с большей степенью вероятности должна существовать в её окрестности. Скорее всего, отражение образовалось от границ прослоя торфа;

4 слой – зона льдонасыщения с показателем объёмной льдистости выше 60%. Сложена серыми суглинками различной степени заторфованности с крупнослоистой криогенной текстурой. Мощность слоя 4,75 м. Нижняя граница на глубине 10,2 м. Когерентный импульс приходит от неё с задержкой 140 нс и амплитудой 19,5 дБ. Увеличение льдистости сказывается больше на затухании. Скорость в слое 0,158 м/нс, затухание 1,16 дБ/м. Границы линзы инъекционного льда фиксируются на пределе фазового разрешения частично когерентными отражениями на времени задержки 95 и 105 нс с амплитудой 24-21 дБ.

По средней скорости 0,146 м/нс положение линзы льда в разрезе хорошо согласуется с данными бурения, но при попытке определить её волновые характеристики получаются результаты, не укладывающиеся в представления о радиофизических свойствах подземных льдов. Объясняется это тем, что алгоритм программы “Signal” разработан для обнаружения отражений от опорных границ слоёв мощностью не менее 1 м. Причём, разрез в окрестности точки скважины, ограниченной первой зоной Френеля должен иметь горизонтально-слоистое строение. Понятно, что для линзы льда мощностью 0,45 м эти условия не соблюдаются;

5 слой – песок мелкозернистый с прослоями детрита чёрного цвета. Криогенная текстура тонкослоистая. Мощность слоя 1,2 м. Нижняя граница на глубине 11,4 м. Когерентный импульс приходит от неё с задержкой 159 нс и амплитудой 17 дБ. Скорость в слое 0,141 м/нс, затухание 1,66 дБ/м. Влияние фактора органики не так сильно, как влияние фактора льдистости. Поэтому скорость остаётся на достаточно высоком уровне, а затухание на низком уровне;

6 слой – песок мелкозернистый с массивной криогенной текстурой и большим количеством прослоев детрита равномерно распределённых по всему слою. Мощность слоя 2,4 м. Нижняя граница слоя на глубине 13,8 м. Когерентный импульс приходит от неё с задержкой 193 нс и амплитудой 12 дБ. Скорость в слое 0,135 м/нс, затухание 2,08 дБ/м. Судя по этим значениям, преобладающее влияние фактора льдистости над фактором органики начинает заметно ослабевать. Неопознанный в разрезе частично когерентный импульс с задержкой 169 нс и амплитудой 14 дБ, по-видимому, отразился от какой-либо фациальной границы песчаных отложений в окрестности скважины.

Завершая описание георадиолокационного разреза заметим, что оставшегося динамического диапазона георадара (12 дБ), работающего на центральной частоте 250 МГц, хватило бы на изучение разреза мёрзлых песчаных отложений примерно до глубины 17-19 м при

⁴ Начальный уровень амплитуды зондирующего импульса зависит от динамического диапазона георадара. Для георадаров серии “ОКО-2” он считается равным 140 дБ.

⁵ Это двойное время задержки при распространении импульса от дневной поверхности до границ слоёв разреза и обратно. Ради сокращения будет употребляться только слово «задержка».

условии сохранения затухания в шестом слое. Что касается другого важного параметра – точности определения георадаром глубины залегания границ разреза, то эта информация приведена в табл. 2.

Табл. 2.

Точность георадиолокационного зондирования

Номер слоя	Глубина залегания подошвы слоя, м		Ошибка зондирования	
	скважина	георадиолокация	в метрах	в процентах
1	1,1	1,1	0,0	0,0
2	3,2	3,7	-0,5	-14,5
3	5,4	5,8	-0,4	-7,1
4	10,2	10,2	0,0	0,0
5	11,4	11,6	-0,2	-1,7
6	13,8	14,1	-0,3	-2,2

По данным бурения линза льда залегает на глубине 7,05-7,50 м. По данным георадиолокации она находится на глубине 6,9-7,7 м. Разница по модулю 0,15-0,20 м.

Таким образом, точность изучения методом георадиолокации структуры и глубины залегания границ разреза булгуньях и содержащейся в нём линзы инъекционного льда, находится на высоком уровне, который сопоставим с точностью изучения разреза методом бурения скважины.

Наконец, обратимся к рис. 5. На нём показано цветное георадиолокационное изображение зоны льдонасыщения или, иначе говоря, ледяного ядра булгуньях. Морфологически границы распространения ледяного ядра в горизонтальном направлении контролируются вершиной булгуньях. Программа “GeoScan32” не выделяет линзу инъекционного льда в градации цветовой шкалы, но по графикам трасс сигналов её границы уверенно прослеживаются максимальными значениями функции синтезированной апертуры в верхней части ледяного ядра. На рисунке линза обозначена белым цветом.

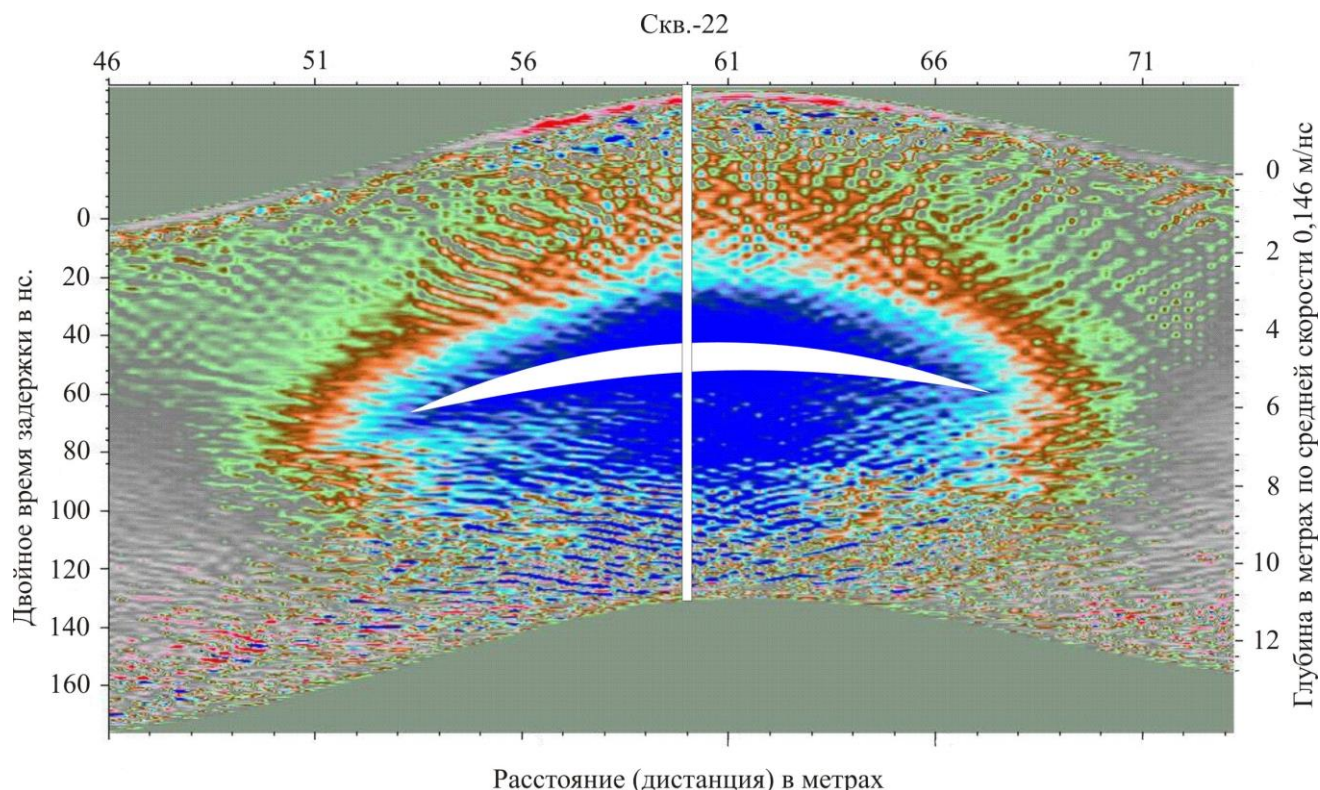


Рис. 5. Фрагмент радарограммы вершины булгуньях, обработанный способом синтезированной апертуры и способом выделения контура. Пояснения в тексте

Верхняя сводовая часть ледяного ядра обрамлена системой интерференционных линий, которые интерпретируются как трещины, образовавшиеся в результате криогенного давления при увеличении мощности инъекционного льда в замкнутой гидрогеологической системе. Судя по конфигурации боковых симметричных ответвлений и корнеобразного проникновения зоны льдистости в нижнюю часть разреза (начиная с глубины около 6-7 м) приходим к выводу, что вакуумный подсос воды необходимый для роста льда, осуществлялся со стороны окружающих водоёмов и из талика, существовавшего под булгунняхом. Из этих рассуждений со всей очевидностью следует, что строение и условия залегания инъекционного льда в озёрно-аллювиальных отложениях булгунняха соответствуют не только представлениям о теоретической модели булгунняхов, но и практическому опыту научно-исследовательских работ, полученному в Центральной Якутии по неглубоким горно-буровым выработкам и реже, по описанию обнажений булгунняхов, разрушенных антропогенной деятельностью.

Заключение

Совместное использование метода георадиолокации и метода дипольного электромагнитного профилирования с привязкой результатов исследований к данным бурения и термометрии опорной скважины показало эффективность изучения в условиях застроенной территории г. Якутска не только литологического и криогенного строения булгунняха, но и условий залегания в нём границ распространения маломощной линзы инъекционного льда. При этом установлена высокая информативность коэффициентов затухания амплитуды импульсной и индуктивной электромагнитной волны и параметра функции синтезированной апертуры. Разработанную методику изучения условий залегания подземных инъекционных льдов рекомендуется апробировать на обширной Центрально-Якутской равнине. Несомненно, что эти исследования расширят научные представления о закономерностях образования и развития булгунняхов. Не стоит забывать, что эти мерзлотные формы рельефа наиболее чувствительны к изменению внешних климатических и антропогенных условий существования и поэтому их целесообразно использовать в качестве долговременных природных реперов в системе мониторинга экзогенных процессов в ходе промышленного и сельскохозяйственного освоения криолитозоны Якутии.

Список литературы

1. Втюрин, Б. И. Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 214 с.
2. Граве, Н. А. Кадастр разведочных выработок на территории города Якутска, пройденных ранее 1965 г. / Н. А. Граве, В. В. Куницкий, П. А. Соловьев, Н. К. Мишарина – Отчет о результатах научно-исследовательских работ 2000-2003 гг. по теме «Региональные геокриологические исследования»: Т. I – Карта фактического материала. – 20 с.; Т. II – Кадастр разведочных выработок – 1020 с.; Т. III – Крупномасштабные планы и схемы расположения выработок на отдельных участках. – 110 с. – Фонды ИМЗ СО РАН, Якутск, 2003 г.
3. Куницкий, В. В. Организация и проведение геокриологического мониторинга на территории города Якутска (промежуточный отчет о результатах научно-исследовательских работ по Государственному контракту № 758) / В. В. Куницкий, Я. И. Торговкин, О. И. Алексеева и др. – Фонды ИМЗ СО РАН, Якутск, 2009. – 202 с.
4. Нерадовский, Л. Г. Изучение состояния и свойств мёрзлых грунтов и криопэгов методом георадиолокации: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.08 / Леонид Георгиевич Нерадовский; Росс. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения. – Якутск, 2005. – 204 с. – Библиогр.: с. 179–193.
5. Нерадовский, Л. Г. Методическое руководство по изучению многолетнемёрзлых пород методом динамической георадиолокации / Л. Г. Нерадовский. – М.: Изд-во РАН, 2009. – 337 с. – (Серия “Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий”: ежегод. изд. МСНТ / гл. ред. Н. П. Ершов).
6. Урбан, А. А. Условия формирования многолетних бугров пучения на территории Якутии / А. А. Урбан // “ЭРЭЛ–2009”: Материалы конференции научной молодежи к 60-летию Якутского научного центра СО РАН и году Молодежи / Якутск: Изд-во ООО РИА “Феникс”, 2009 – С.147–151.

Статья опубликована: Журнал «Инженерные изыскания», №3/2013, стр. 46-53