

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Бричева Светлана Сергеевна**



**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ КРИОГЕННЫХ  
ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОМОЩИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре сейсмометрии и геоакустики  
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

**Научный руководитель** — **Владов Михаил Львович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор

**Официальные оппоненты** — **Глазунов Владимир Васильевич**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
Горный университет», профессор

**Модин Игорь Николаевич**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный  
университет имени М. В. Ломоносова»,  
профессор

**Христофоров Иван Иванович**  
кандидат технических наук,  
ФГБУН Институт мерзлотоведения им.  
П.И. Мельникова СО РАН, старший  
научный сотрудник

Защита диссертации состоится «18» апреля 2018 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета МГУ.04.03 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 308.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/101393695/>

Автореферат разослан «\_\_» марта 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



В.А. Шевнин

## *ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ*

### **Актуальность темы исследования**

Повсеместная распространённость многолетнемёрзлых и сезонномёрзлых пород в арктическом регионе, как и в мире в целом, обуславливает их важность в хозяйственной деятельности человека, изучение мёрзлых пород входит в число важнейших мировых проблем. Изучение специфики мёрзлых пород необходимо при решении многих практических задач, таких как разведка и разработка месторождений полезных ископаемых, строительство промышленных, гражданских, и других объектов, коммуникаций, трубопроводов, эксплуатация и строительство железных дорог в северных районах и других. Активное освоение областей распространения мерзлоты сопряжено с большими рисками для любой жилищной и промышленной инфраструктуры в связи с вытаиванием подземного льда. Подземные, в частности, полигонально-жильные льды (ПЖЛ) распространены на мерзлоте очень широко. На поверхности они формируют так называемые полигональные решётки – сеть из морозобойных трещин и полигонов между ними. Этот узор на поверхности земли является важным идентификатором наличия процесса льдообразования при дешифрировании космических снимков. Однако в ряде случаев такой признак наличия льдов отсутствует, о наличии «скрытых» жильных льдов – не имеющих характерного полигонального рельефа на поверхности – можно судить по обнажениям в речных берегах и по проявлениям термокарста на линейных объектах. Изучение положения таких «скрытых» ПЖЛ в разрезе является актуальной задачей инженерной геокриологии и геофизики. Другой не менее важной задачей при исследованиях мёрзлых пород самого разного целевого назначения является определение формы и размеров ледяных образований. Эта задача в чистом виде междисциплинарная, её решение позволит предсказывать объём воды, которая может высвободиться при вытаивании льда. Но кроме того, знание формы и размеров ПЖЛ, необходимо для понимания климатических условий, в которых они формировались, а это одна из ключевых задач палеогеографических исследований.

Метод георадиолокации давно снискал себе популярность в работах на мёрзлых породах, это связано с его высокой производительностью при сравнительно низкой стоимости проведения работ, высокой чувствительности электромагнитных свойств к границе перехода лёд-вода, неинвазивностью и экологичностью. К сожалению, в настоящее время качественная интерпретация данных георадиолокации, полученных на разрезах, сложенных мёрзлыми породами, вызывает определённые трудности – геометрия границ здесь бывает очень сложна и не поддаётся точному выделению по результатам только стандартной обработки. Стандартная обработка сводится к выделению на

радарограммах только осей синфазности и заключению о определении глубины отражающих границ, чего явно недостаточно для полноценного выделения этих ледяных включений. Об этом свидетельствуют некоторые работы отечественных и зарубежных учёных, например, [Arcone et al., 1982; Dallimore and Davis, 1992; Doolittle et al., 1992 и др.]. Наибольших успехов добились коллеги из США, Канады, Японии и Германии. В ряде ярких работ ([Yoshikawa et al., 2006; Watanabe et al., 2013; Kohout et al., 2014; Schennen and Tronicke, 2015 и др.]) продемонстрировано, какие технологии позволяют выделять различные части ледяных образований. Здесь и съёмка в разные сезоны, и комплексирование методов, и сложные процедуры обработки, и технологии атрибутного анализа. Однако в русскоязычной литературе сведений о таких работах очень мало, на сегодняшний день их общее число не позволяет вывести однозначные рекомендации. Назрела острая необходимость обобщить имеющийся на сегодняшний день материал по исследованию криогенных объектов методом георадиолокации, предложить и протестировать методику, которая позволит извлекать максимум информации из полевых данных, полученных на криогенных объектах.

**Цель диссертационной работы** заключается в разработке методики изучения ряда криогенных объектов и вмещающих их пород при помощи георадиолокации на основе математического, физического моделирования и натурных экспериментов. Для достижения цели решались следующие **задачи**:

- Изучить и проанализировать различные типы криогенных образований, опыт использования метода георадиолокации для их изучения, выделить ряд объектов для изучения в работе.
- Построить электрофизические модели изучаемых криогенных объектов и на их основании составить классификацию этих объектов в поле электромагнитных волн георадарного диапазона.
- На основе электрофизических моделей выявить и проанализировать признаки криогенных объектов в волновом поле – кинематические (форма осей синфазности, скорость распространения волн) и динамические (амплитуды, модули спектров, энергия сигнала) характеристики волнового поля.

#### **Фактический материал исследования**

При подготовке данной работы использовались полевые материалы, полученные автором на различных регионах, в разных климатических и ландшафтных условиях, в разные сезоны года: Полуострова Ямал и Гыдан, Россия (август-сентябрь 2013); Владимирская Мещёра, Россия (январь 2015); Финская Лапландия, Финляндия (март 2015); Чарская котловина, Забайкальский край, Россия (июль-август 2015); Авдеево,

Курская область (июль 2016, май 2017). Также использовались результаты физического моделирования, проведённого автором в университете Потсдама, Германия, в январе-феврале 2018 года.

### **Научная новизна работы**

- Предложена новая методика определения скорости электромагнитных волн – «натурное моделирование» – которое позволяет быстро и однозначно определять скорость на проходящих волнах в полевых условиях, например, для целей определения свойств торфов и при археологических исследованиях.
- Впервые построены электрофизические модели нескольких типов криогенных объектов (полигонально-жильных льдов, псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам и бугров пучения).
- Впервые показано, как в результате комплексного анализа георадиолокационной записи с применением численного и физического моделирования можно восстановить историю развития процесса и стадию формирования криогенного объекта.
- Расширен класс численных моделей криогенных объектов за счёт учёта их разнообразной формы и свойств вмещающих пород, в частности, впервые проведено численное моделирование георадарного профилирования над жилой сложной формы и изучено влияние проводимости вмещающей породы на результат моделирования.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- [1]. Предложенный набор моделей криогенных объектов (полигонально-жильные льды, псевдоморфозы по полигонально-жильным льдам, бугры пучения) для решения прямой задачи позволяет классифицировать данные объекты в поле электромагнитных волн радарного диапазона.
- [2]. Предложенная методика прямого параметрического измерения скорости (в работе предложено название «натурное моделирование») позволяет оценивать скорость в изучаемой среде *in situ* на проходящих (а также на отражённых) волнах напрямую без применения сложных поверхностных методик наблюдения, в отсутствие дифрагирующих объектов в разрезе и буровых скважин в пределах профиля. Данная методика может быть применена для расчленения разреза по скоростям.
- [3]. Предложенный набор характеристик (атрибутов) георадарной записи – форма осей синфазности, энергия, амплитуда, а также центральная частота спектра – позволяет выявлять на полевой записи объекты типа бугров пучения, полигонально-жильных льдов и псевдоморфоз по ним, в том числе не выраженных в микрорельефе.

### **Практическая значимость результатов исследования**

Предложенная соискателем методика изучения криогенных объектов значительно расширяет область применения метода георадиолокации. Комплекс процедур может быть применён как единое целое и по отдельности, ценность его при этом не уменьшается. Объектом изучения подобной методикой могут выступать не только криогенные объекты, что значительно повышает значимость проведённого исследования. Результаты и выводы настоящей работы позволят рекомендовать георадиолокацию в комплекс инженерно-геологических изысканий и с её помощью значительно повысить геофизическую изученность территории нашей страны, находящихся в зоне распространения мерзлоты. Методические рекомендации, предложенные в работе, могут быть использованы специалистами геокриологами и геоморфологами при изучении криогенных объектов. Методика прямого определения скорости может быть использована в любом исследовании методом георадиолокации, где требуется точно восстанавливать глубины отражающих границ, не обладая априорными сведениями о скоростях.

### **Теоретическая значимость результатов исследования**

Некоторые этапы предложенной методики, в частности, параметрические измерения скорости в полевых условиях, станут важным шагом на пути к решению фундаментальной задачи определения физических свойств пород по данным георадиолокации. Численное моделирование в приложении к объектам, изучаемым при помощи георадара, позволит углубить понимание процессов распространения электромагнитного поля и отдельно изучить влияние различных факторов на волновую картину, грамотно построить физическое моделирование и полевой эксперимент.

### **Достоверность результатов исследования**

Результаты, включенные в диссертационную работу, получены на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современного высокоточного сертифицированного геофизического оборудования, компьютерных программ обработки геофизических данных и программ моделирования. Основные выводы и рекомендации, сформулированные автором, обоснованы теоретически; защищаемые положения не противоречат материалам ранее опубликованных работ по данной тематике, а также хорошо согласуются с результатами численного моделирования и полевых экспериментов.

### **Материалы и методы исследования**

Для решения поставленных в работе задач применялись различные инструменты. Сбор полевого материала производился при помощи геофизического оборудования – георадаров ОКО-2 (ЛОГИС-ГЕОТЕХ, Россия), Zond 12e («Radar Systems», Латвия) и

MALÅ («Guideline Geo», Швеция) с широким диапазоном частот антенных блоков, каждый раз выбираемых исходя из условий поставленной задачи. Сбор и обработка полевых материалов велись в программах GeoScan32, Prism2 и RadExplorer. Ряд процедур обработки происходил в программе RadExPro. Для артибутового анализа использовалась программа AtrAn. Построение синтетических моделей объектов велось в свободно распространяемой программе gprMax, для обработки и визуализации использовалось программный пакет MATLAB. Физическое моделирование производилось с использованием георадара pulseEKKO PRO (Sensors&Software, Канада).

### **Личный вклад автора**

Обширный полевой материал, полученный в ходе многочисленных полевых сезонов 2013-2017 гг., собран, обработан и проанализирован лично автором. Численное моделирование также проводилось автором. Методика определения скорости с использованием натурных моделей предложена, опробована и подтверждена непосредственно автором. Физическое моделирование и сопровождающее его численное проведено при непосредственном участии автора в ходе зарубежной стажировки. Все результаты и выводы настоящей работы принадлежат автору.

### **Апробация работы**

Результаты работы были апробированы в ряде исследований, неоднократно докладывались автором на научно-дискуссионном семинаре МГУ «Современные проблемы геофизики», а также на 20 конференциях, в том числе на 10 международных. Материалы опубликованы в сборниках конференций, расширенные тезисы международных конференций цитируются в системе Scopus. Результаты настоящей работы легли в основу пяти публикаций в научных журналах. **По теме исследования опубликована** 31 печатная работа, из которых 5 статей в журналах из перечня ВАК, 5 печатных работ (в том числе 2 статьи) индексируются в системах Scopus, Web of Science.

### **Структура работы**

Работа состоит из введения, 5 глав, раздела методических рекомендаций по изучению криогенных объектов при помощи георадиолокации, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 168 страниц, включая 88 рисунков и 3 таблицы. Используемая библиография включает 119 наименований, из которых 71 – на английском и французском языках.

### **Благодарности**

Это исследование выполнялось под руководством доктора физико-математических наук профессора Михаила Львовича Власова, заведующего кафедрой сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ им. Ломоносова. Я признательна ему за веру

в мои силы, терпение и поддержку на всех этапах моей работы в не меньшей степени, чем за полезные обсуждения и отзывы относительно всех изложенных здесь мною идей. Благодарю Михаила Львовича отдельно и за то, что он всегда поддерживал во мне свободу научного творчества.

Мои старшие коллеги – Старовойтов А.В., Модин И.Н., Александров П.Н., Золотая Л.А., Бобров Н.Ю., Дёмина И.М., Панин А.В. и другие на протяжении многих лет оказывали мне поддержку, давали дельные советы и всегда были для меня примером. Я также благодарю моих коллег, за годы общения и работы ставших мне друзьями – вдохновлявших меня Алису Баранскую и Артёма Гуринова, Наталью Карпухину и Штефана Шеннена, Илью Ёжикова, Дмитрия Мамонтова, Андрея Палёнова, Александра Ермакова и Александра Ошкина, и многих других. Без тёплой поддержки и веры в мои силы этих людей мне было бы намного труднее.

Хочу отдельно выразить признательность коллективу семинара «Современные проблемы геофизики», вести который в качестве секретаря я имею честь уже четвёртый год. Этот семинар с самого первого дня стал важной частью моей жизни, многочисленные доклады, слушателем (а иногда и докладчиком) которых я была, помогли мне лучше построить собственное исследование, избежать ошибок. Многих знакомых и друзей в научном сообществе я обрела благодаря семинару!

Моё исследование было бы голословным, если бы не значительный по объёмам полевой материал, который я собирала в экспедициях. Я хочу поблагодарить руководителей моих экспедиций – Юлию Станиловскую и Дмитрия Олеговича Сергеева, Владимира Аркадьевича Оношко и Томаша Кохоута (Tomas Kohout), Михаила Николаевича Кандинова и Андрея Валерьевича Панина.

Очень важный вклад в мою работу внесли немецкие коллеги, в первую очередь Штефан Шеннен (Stephan Schennen), чья область научных интересов очень близка моей. Вдумчивое сравнение наших результатов, совместная работа по физическому моделированию, написание совместных зарубежных публикаций и, наконец, настоящая дружба не могут не быть отмечены мною. Отдельно благодарю Штефана за помощь в создании численной модели реальной жилы льда из Чарской котловины. Я благодарю также профессора Jens Tronicke и сотрудников лаборатории прикладной геофизики Потсдамского университета, в чьём прекрасном обществе я проходила стажировку. Отдельно хочу поблагодарить Себастьяна Застружного (Sebastian Zastruzny) – мои немецкие коллеги не только помогли мне перешагнуть языковой барьер, но и щедро делились своим взглядом на мир и культурой своей страны.

И наконец, я благодарю от всего сердца моего супруга, Виктора Матасова. Я счастлива была познакомиться с этим исключительным человеком в самом начале моего аспирантского пути и это знакомство во многом определило мой взгляд на вещи, географию и вектор моих исследований, долгие беседы неоднократно помогали мне структурировать работу. Чуткий взгляд географа-ландшафтоведа помогал мне избегать категоричности в суждениях, узости взгляда, открывал множество неведомых мне прежде граней в жизни и науке. Благодарю за понимание, терпение и за счастье жить, работать и узнавать этот мир вместе.

Сей скромный труд я посвящаю светлой памяти моего первого научного руководителя, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры Физики Земли СПбГУ Сергея Сергеевича Крылова, скоропостижно ушедшего из жизни год тому назад. Сергей Сергеевич привил мне интерес к георадиолокации, увлѣк темой вечной мерзлоты, снарядил в первую экспедицию, стал первым соавтором и определил мой путь в науке. Человек безграничного оптимизма и глубоких научных познаний, он навсегда останется в моём сердце.

### **Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи, описана практическая значимость и научная новизна работы, приведены объѣм и структура работы.

В **первой главе «История и современное состояние метода георадиолокации применительно к работам на мерзлоте»** представлен литературный обзор работ, посвящённых применению георадара на многолетнемёрзлых породах, описаны преимущества и недостатки георадиолокации на ММП, пути решения проблем, намечены основные направления развития метода и сформулированы задачи настоящего исследования. Повествование разбито на разделы, отражающие этапы развития представлений о методе на мерзлоте в целом, появления новых технологий обработки данных и поиска новых объектов изучения. Отдельным разделом является численное моделирование как способ решения прямой задачи георадиолокации. Объѣм литературного обзора составляет 50 страниц, библиография включает в себя 118 наименований.

Из представленного в Главе 1 обзора очевидно, что существует недостаток понимания особенностей работ методом георадиолокации на криогенных объектах, малое

число примеров таких работ, требуется осмысление существующих знаний и разработка новых подходов к анализу данных. Для этого важно понимать, как распространяются электромагнитные волны в веществах, слагающих мёрзлую породу. Во **второй главе «Основные физические понятия»** изложены основополагающие принципы георадиолокации на мёрзлых породах, даны определения наиболее важных понятий, используемых в тексте, в частности, понятий *электрофизической модели* и *кинематических и динамических характеристик записи*, приведены формулы, на которые автор неоднократно ссылается в последующих главах. Теоретическая база этой главы – фундаментальные труды классиков георадиолокации и геокриологии М. И. Финкельштейн, А. Д. Фролова, а также современников автора М. Л. Влагова, А. В. Старовойтова, Питера Аннана и других.

В **третьей главе «Характеристика изучаемых криогенных объектов»** описаны объекты исследования и обоснован их выбор, даны их значимые характеристики, описаны основные факторы, влияющие на морфометрию и электрофизические свойства объектов. В работе рассмотрены объекты, формирующиеся в результате действия двух геокриологических процессов – морозобойного растрескивания и морозного пучения. Это четыре типа объектов: (1) полигонально-жильные льды (ПЖЛ); (2) псевдоморфоза по ПЖЛ (грунтовая жила); (3) бугры пучения типа *пинго*; (4) бугры пучения типа *пальза*. Кроме общей геологической характеристики объектов сформулированы также их электрофизические модели, отражающие распределение и пределы электромагнитных свойств, обозначены электрически контрастные границы. По ряду объектов приведены примеры волновых картин из полевых работ автора. На основании этих моделей создана классификация объектов в волновом поле. Классификация представлена в виде таблиц картировочных признаков для каждого вида объектов – как классических геоморфологических характеристик (форма залегания слоёв, структура, влажность и др.), так и кинематических и динамических характеристик радарограммы (форма осей синфазности, частотный состав записи и др.), между этими характеристиками проведено соответствие. Приведённые в главе сведения о типах и особенностях криогенных объектов, исследуемых в диссертации, об их размерах, их электрофизических параметрах позволяют заключить, что георадиолокация может успешно применяться для их исследования не только с точки зрения картирования (есть объект или его нет), но также для определения размеров и стадий развития объектов, их свойств и состояния. Крайне важным представляется построение электрофизических моделей изучаемых объектов, которые должны включать в себя весь массив сведений об электрических свойствах. Из этого следует **защищаемое положение № 1**. Подобная классификация необходима для

грамотной постановки эксперимента, для решения прямой и обратной задач георадиолокации, она может быть проведена для любого типа объектов, не только криогенных. Создание электрофизических моделей и классификацию по ним будем считать первым этапом в **методике изучения криогенных объектов при помощи георадиолокации**. Результатом этого этапа должен стать свод (таблица, список) признаков, которыми объект характеризуется на радарограмме; знание размеров и характера залегания объектов в разрезе позволит определить требуемую разрешающую способность и глубинность, сформулировать первые рекомендации по постановке полевого эксперимента.

**Четвёртая глава «Методика исследования»** – основная в диссертации. В ней рассмотрены методы, впоследствии объединённые в методику изучения криогенных объектов при помощи георадиолокации. В первую очередь в Главе 4 подробно рассмотрена технология полноволнового численного моделирования методом конечных разностей во временной области в свободно распространяемой программе grgMax, рассмотрены особенности создания моделей, обсуждаются вопросы моделирования граничных условий, выбора оптимального размера ячейки, численной дисперсии. Автором проведено тестирование возможностей программы на собственной простой модели, представляющей собой куб воды с различными свойствами. На этой модели было показано, что программа grgMax достаточно точно отображает распространение сигнала в среде – такие важные особенности, как падение амплитуды с расстоянием, поглощение энергии сигнала, дисперсия находятся в соответствии с теорией. При этом наибольший вклад в снижение амплитуды сигнала, изменение его формы и падение частоты вносит проводимость среды. При росте проводимости проявляется дисперсия, даже если изначально параметры среды не зависят от частоты. Отдельно изучено влияние проводимости среды на динамические характеристики записи, такие как фаза и амплитуда – показано существенное влияние на них проводимости выше  $\sigma = 0.1$  См/м. В задаче определения формы и размеров погребённых льдов проводимость может оказывать серьёзный эффект если, например, мёрзлые породы расположены в прибрежной зоне, где повышена минерализация вмещающих лёд пород. Существенно, что такой параметр, как тангенс угла диэлектрических потерь, для малых значений проводимости почти сразу становится меньше единицы, а при росте проводимости он превышает единицу во всем радарном диапазоне частот. Такое существенное влияние проводимости должно учитываться при физическом моделировании и в ходе полевых наблюдений. С учётом всех кратко приведённых выше соображений были построены **численные модели** ледяных жил в grgMax. Цель этого этапа методики состояла в том, чтобы понимать, какие факторы влияют на получаемую в ходе георадиолокации волновую картину. Автором были рассмотрены некоторые из них: наличие в разрезе кровли ММП (случай летнего сезона,

СТС в талом состоянии); форма жилы; ширина кровли, угол раствора клина и проводимость вмещающей среды. Некоторые примеры приведены на Рис. 1.

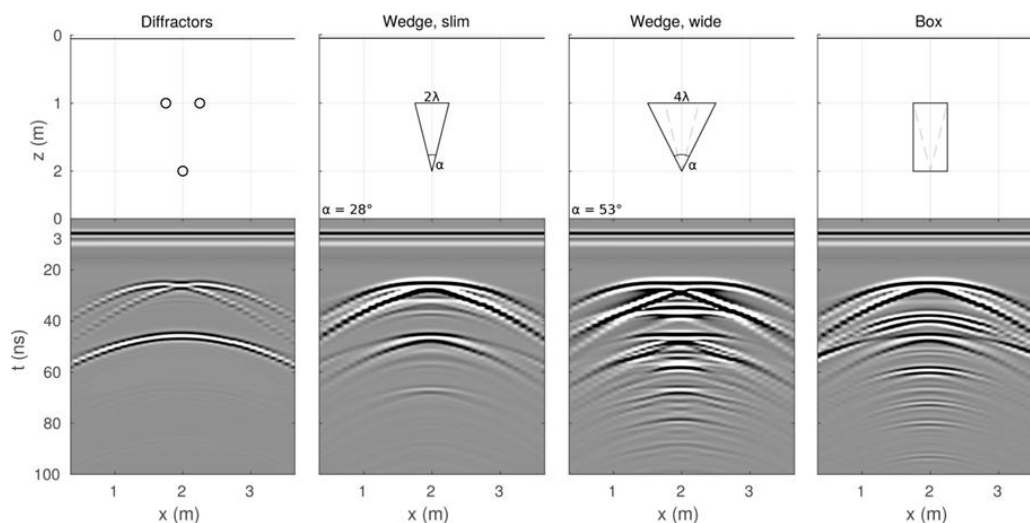


Рис. 1. Синтетические радарограммы над тремя точечными отражателями, над узкой треугольной жилой, широкой треугольной жилой и над прямоугольной жилой.

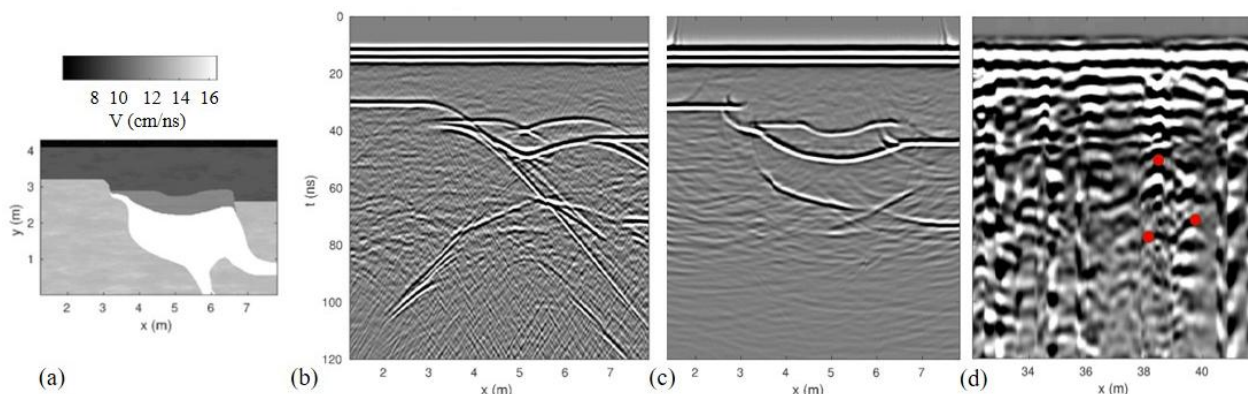


Рис. 2. Модель реальной жилы на основе геокриологического разреза (а), синтетическая радарограмма над моделью жилы (b), результат применения процедуры миграции (с), Реальная радарограмма, полученная над ледяной жилой, видимой в обнажении (d).

В простых моделях отчётливо видны гиперболические отражения от точечных отражателей, краёв жил; горизонтальные отражения от кровли и подошвы – в случае прямоугольной жилы. Фиксируются кратные отражения и явления интерференции, когда две гиперболы слились в одну. Заметно, что кровля жилы формирует высокоамплитудную горизонтальную ось синфазности, по краям которой образуются гиперболы дифракции. В примере с широкой жилой в середине появляются наклонные отражения от боковых стенок. В реальных условиях такие мелкие детали, конечно, не могут быть различимы, однако для физического моделирования такой результат, несомненно, полезен. Численно в gprMax возможно смоделировать и реальные жилы, на Рис. 2 приведён пример подобного моделирования. Геокриологический эскиз жилы из обнажения реки Чара, где проходила экспедиция с участием автора диссертации в 2015 году, был составлен Ю. В. Станиловской [Васильчук и др., 2010] в 2010 году. Он был использован для построения

модели из пяти различных упрощённых сред. В качестве источника использовался импульс Рикера с центральной частотой 180 МГц (с учётом падения частоты). Данные показывают сложную интерференционную картину со множеством псевдогиперболических отражений. К этим данным была применена процедура миграции Кирхгофа, скорость распространения волн в модели известна. В результате применения этой процедуры становится возможным выделить отражения от верхней и нижней поверхностей ледяного тела. Таким образом можно примерно оценить геометрию тела по характерным точкам и границам. Так как над этой жилой было проведено профилирование в полевых условиях, возможно сравнить результат моделирования с реальной радарограммой (Рис.2d). Нужно отметить, что жила в реальности в 2015 году имела несколько иную форму, чем это было в 2010 году, когда она была описана, кроме того, профилирование велось в 1.5-2 м от берега в целях безопасности. Однако общие черты жилы сохранились. Реальная волновая картина оказалась чрезвычайно сложна для интерпретации. Кровля ММП выражена неявно, так как в обнажении происходит вытаивание всего обнажённого массива пород, в том числе и многолетнемёрзлых. Обращает на себя внимание псевдогиперболическое отражение на 38.5 метре профиля. По этой гиперболе удалось оценить скорость, она составила примерно 7 см/нс. Несколько псевдогипербол были также заметны вблизи первой, они отмечены маркерами красного цвета. Процедура миграции по Кирхгофу, применённая к реальным данным, не дала столь яркого результата, как на данных численного моделирования. Вершины гипербол заметны даже хуже, чем на не мигрированных данных. Факторов, влияющих на волновую картину в реальности, намного больше, чем даже в усложнённой модели. Тем не менее, решение прямой задачи при помощи численного моделирования чрезвычайно важно, оно помогает проверить сделанное на первом шаге предположение о признаках, характеризующих объект в волновом поле. Какие-либо признаки могут не проявиться в численной модели (это значит, что они ошибочны, или параметры модели не позволяют их зафиксировать). Численно можно смоделировать отражение радарного импульса от среды с заданным распределением электрических свойств по глубине. В то же время численное моделирование оказывает неоценимую услугу и на этапе обработки данных, в том числе глубокой. Именно на синтетических радарограммах возможно протестировать процедуры обработки, которые сделают признаки (оси синфазности, частотный состав записи и др.) заметнее.

Результаты численного моделирования недостаточно точно отражают реальную среду и могут использоваться при интерпретации полевых данных с большими оговорками, как это было продемонстрировано выше. Реальная среда существенно

сложнее любых моделей, и сам георадар не является идеальным измерительным средством, некоторые эффекты, происходящие в источнике излучения, не могут быть смоделированы. В случае со сложным объектом, которым является погребённая ледяная жила, определённую помощь может оказать **физическое моделирование**, поскольку в нём используется реальная измерительная система, реальный георадар, хотя среда по-прежнему остаётся идеализированной. В большинстве физических модельных экспериментах используются высокочастотные антенны, как наиболее компактные и удобные в лабораторных экспериментах. Важно грамотно соблюсти критерии электромагнитного подобия при распространении результатов физического моделирования на реальную среду. В Главе 4 описан эксперимент по **физическому моделированию жильного льда, проведённые автором** в ходе стажировки автора в Институте наук о Земле и окружающей среде Потсдамского Университета (Бранденбург, Германия) зимой 2018 года. Использовался лабораторный георадарный стенд, представляющий собой прямоугольный пластиковый бак размерами 58 (высота) × 91 × 110 см. Над баком закреплена координатная система из пластиковых труб и рельс, позволяющая плавно перемещать антенну георадара с требуемым шагом над поверхностью модельной среды. В качестве модельной среды использован чистый сухой песок, а затем водопроводная вода. Модель жилы была изготовлена из плотного пенопласта. Для моделирования использовался георадар pulseEKKO PRO с отдельными антенными блоками 1 ГГц. На подготовительном этапе модельные материалы были детально изучены – были определены скорости электромагнитной волны в песке и пенопласте различными способами (напрямую, методом отражённых волн и методом годографа). Листы пенопласта, из которых была впоследствии сформирована жила, также были изучены на предмет анизотропии скорости, для создания модели использовались наиболее однородные блоки. Средняя скорость волны в песке по результатам наших наблюдений составила  $V_{\text{пес}} = 13.85 \pm 0.65$  см/нс, а в пенопласте  $V_{\text{пен}} = 22.13 \pm 0.88$  см/нс. Таким образом, длина волны в песке для антенны 1 ГГц (уменьшение центральной частоты почти не наблюдалось) составила  $\lambda_{\text{пес}} = 14$  см, а в пенопласте  $\lambda_{\text{пен}} = 21$  см. Для создания наилучшей физической модели жилы, которая позволит наблюдать отдельно отражения от краёв и от нижней точки, было проведено предварительное численное моделирование в программе grgMax. Было принято решение создать модель жилы в форме треугольной призмы и поместить её не по центру бака, а со смещением к одной из его сторон – это позволило наблюдать один из верхних углов жилы наиболее чётко, практически без боковых отражений от стенки бака. Контраст скоростей между песком и пенопластом сравним с контрастом между мерзлым песком и льдом (9 и 16 см/нс соответственно).

Размеры модельной жилы по высоте и ширине кровли (30 и 42 см) относятся к длине волны антенны 1 ГГц в песке примерно, как 1:2 и 1:3 соответственно. В полевых условиях для работы на жильных льдах обычно используются антенные блоки 250-400 МГц. Длина волны в мёрзлом песке для них составляет около 0.5 метра (с учётом падения частоты). Таким образом, данные эксперименты подобны исследованию жильных тел мощностью 1-1.5 м, шириной кровли 1.5-2 м, перекрытых 0.7-1 м песка с использованием стандартных полевых антенн георадара (250-400 МГц). Такие жильные льды встречаются довольно часто, например, они распространены в Чарской котловине, где автором проводились полевые работы. Профилирование велось при хорошем согласовании антенны и

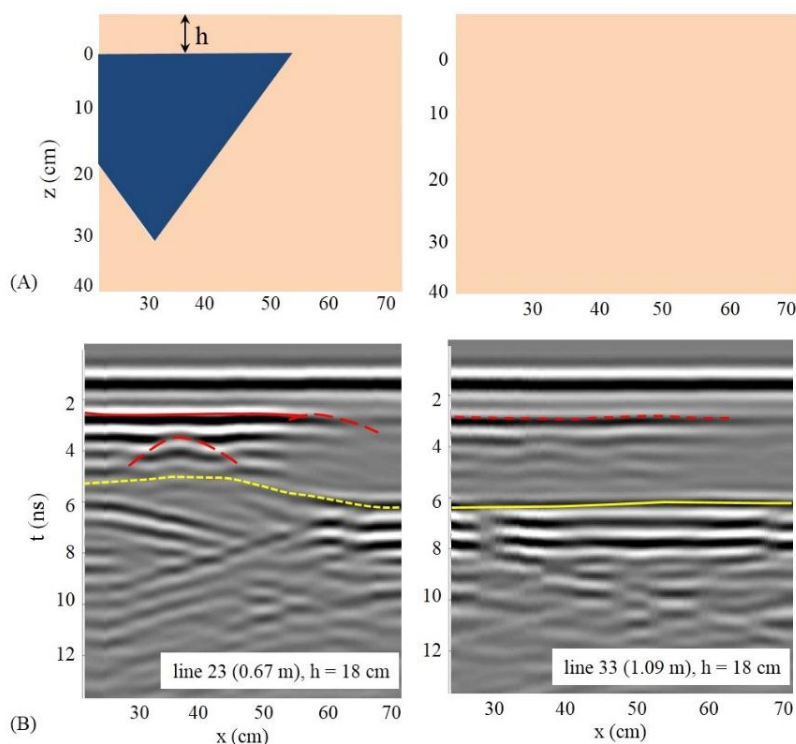


Рис. 3. Профили над жилой (слева) и без жилы (справа).  
А – схема модели, В – результирующие профили.

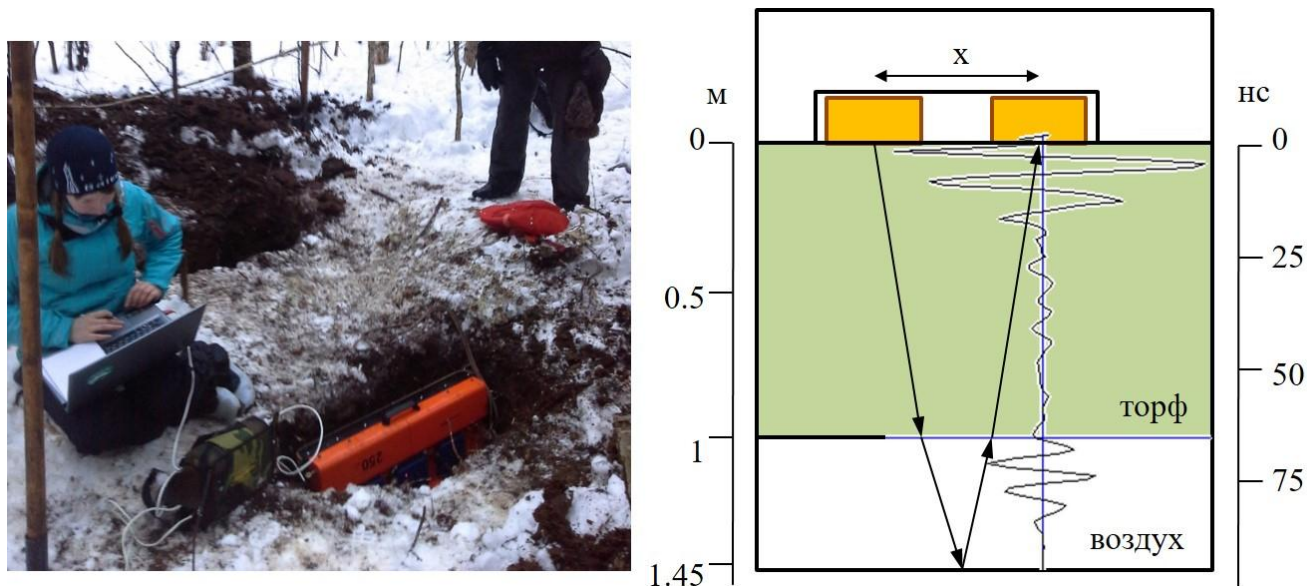
поверхности, модель была покрыта серией профилей, шаг между которыми составил 2.5 см. Профили покрывали часть модели с жилой и часть – без. Результаты представляли собой отдельные профили, и послойные изображения, построенные в MATLAB. На Рис. 3 приведены два профиля – над жилой и над участком бака, где жилы нет. Кровлю жилы возможно чётко отделить от сигнала прямого прохождения. «Ус» гиперболы, отходящий от края жилы, отмечен красным пунктиром. Стоит отметить, что на правой картинке, в отсутствие жилы непосредственно под антенной (радар расположен примерно в 10 см от жилы) всё равно наблюдается горизонтальное отражение на временах, соответствующих распространению сигнала через песок до кровли жилы. Этот «след» жилы, связанный со сферичностью фронта волны и действием принципа Гюйгенса-Френеля, может ввести интерпретатора в заблуждение относительно реальных размеров отражающего объекта. Отдельным важным исследованием представляется построение моделей большего размера и изучение, до каких пределов распространяется «след» объекта, до каких пор его будет видно на записи. Отражение от дна бака хорошо видно на профиле без жилы в районе 6 нс. На радарограмме, где присутствует жила, отражение от

дна местами размыто, изогнуто. Это связано с высоким контрастом скоростей внутри жилы и вне её – чем больше становится мощность жилы под антенной, тем быстрее сигнал доходит до дна бака, граница дна на радарограмме изгибается, поднимается «ближе» к поверхности, и сливается с переотражениями от жилы и внутри неё. Отдельно в ходе физического моделирования было исследовано, как изменяется волновая картина, если георадарный профиль расположить не перпендикулярно жиле, а под углом  $45^\circ$  к направлению её распространения. Как и ожидалось, при прохождении над жильным телом не под прямым углом к его распространению вероятность неверного определения его размеров и положения по гиперболе возрастает. В таком случае рекомендуется делать как минимум два прохода над предполагаемым жильным телом и при интерпретации доверять тем профилям, гиперболические отражения на которых уже, нежели тем, на которых они шире. Затем эксперименты были повторены с водой в качестве модельной среды. Высокий контраст между скоростями в воде и пенопласте позволил пронаблюдать характерные особенности волновой картины наиболее ярко. В частности, на временных срезах можно отчётливо различить контуры пенопластовой жилы, и даже блоки, из которых она состоит. Подробно результаты данных экспериментов будут представлены в статье, в настоящий момент готовящейся к публикации.

Перед методом георадиолокации по сей день стоит важный вопрос, связанный с взаимодействием электромагнитного поля с физическими свойствами исследуемого объекта. Расчленение разреза по скоростям может быть использовано для расчленения его по физическим свойствам. От точности определения скорости в среде зависит точность построения глубинного разреза. В Главе 4 предложена новая **методика определения скорости электромагнитных волн в разрезе**. Точность имеющихся на сегодняшний день косвенных измерений скорости недостаточна для сложных задач, к которым относятся поставленная в диссертации задача определения размеров и положения в разрезе электрически контрастного, ледяного или сильно льдистого тела, а также задачи геоэкологического мониторинга, почвоведения и археологии. Как провести прямое определение скорости в конкретный момент времени, *in situ*? Перспективными автору представляются прямые параметрические наблюдения методом георадиолокации непосредственно на месте проведения работ. Методика параметрического измерения скорости, которую предлагается назвать «**натурное моделирование**» – эксперимент на самом исследуемом объекте, который при специально подобранных условиях опыта служит **моделью самого себя**. Модель создаётся в полевых условиях при помощи лопаты – из массива исследуемой породы выделяется «куб», на котором проводится параметрическое измерение с использованием стандартных антенн георадара, имеющихся

в наличии. Эксперимент, аналогичный физическому моделированию, но проводимый прямо в полевых условиях, имеет ряд преимуществ. Во-первых, отпадает необходимость транспортировки крупных образцов. Во-вторых, исследуемая среда находится непосредственно в тех физических и температурных условиях, что и в ходе полевых работ. Последний факт особенно важен при работах зимой, когда почва промерзает. В-третьих, в некоторых случаях удаётся провести эксперимент с той же самой антенной, что и в ходе исследовательских работ. Это избавляет от необходимости учитывать влияние частоты приложенного поля – дисперсию свойств. В Главе 4 сформулированы физические основы натурного моделирования, отмечены особенности, на которые необходимо обращать внимание, например, зона источника. Примеры апробации методики также представлены. Методика натурного моделирования была разработана для оперативной оценки скорости электромагнитных волн во вмещающих различные объекты породах в полевых условиях. Однако она применима в любых условиях для любых задач. Для ПЖЛ вмещающими породами в большинстве случаев являются пески, суглинки и торфа. Поэтому методика была протестирована на двух объектах – на торфянике и на песчано-суглинистом разрезе. В обоих случаях задача не касалась мерзлоты, однако натурное моделирование позволило получить сведения о скоростях, крайне необходимые в обеих задачах, что демонстрирует актуальность данной методики в самых разных задачах. Рассмотрены две модификации: классическая схема с совмещёнными источником и приёмником и прямые измерения скорости через «куб» породы. В ходе комплексных ландшафтных исследований в национальном парке «Мещёра» зимой 2015 года, автором была апробирована данная методика определения скорости для расчленения торфяного разреза. Был выбран участок, расположенный на этом же поле торфоразработок в зоне с наибольшей мощностью торфа (до 2 м), на нём выкопаны два шурфа глубиной 1 м, на расстоянии 1 м друг от друга (Рис. 4). Так была создана натурная модель – «куб» торфа с неизменёнными свойствами и температурой. В один из шурфов вплотную к стенке «куба» помещались совмещённые антенны георадара, направленные в сторону соседнего шурфа, затем георадар включался и вёл запись в непрерывном режиме. Сигнал из передающей антенны проникал в «куб» торфа, проходил его насквозь, и на радарограмме формировались прямая волна и отражения от границ торф-воздух и воздух-торф, а также ряд боковых отражений. Одновременная запись обоих каналов (250 и 700 МГц) позволила ускорить эксперимент и сравнивать результаты двух антенн, полученные в одинаковых условиях. Среднее значение скорости в торфе 3.7 см/нс – маленькое, близкое к скорости в чистой воде, диэлектрическая проницаемость торфа в таком случае составит 73. Образец торфа, взятый непосредственно в месте проведения эксперимента, имел весовую влажность 67 % и

зольность 3.6 %. Торф при такой высокой влажности может иметь такую низкую скорость прохождения электромагнитного импульса. Результаты данного исследования подробно изложены в статье [Бричева и др., 2017].



*Рис. 4. Пример проведения эксперимента по параметрическому измерению скорости на торфянике с совмещёнными антеннами; справа – схема прохождения сигнала через модель с наложенной на неё трассой для антенны 250 МГц.*

Вторая модификация натурального моделирования – с использованием отдельных антенн была протестирована автором в ходе работ на позднепалеолитической стоянке Авдеево, Курская область. Георадиолокация применялась для изучения строения надпойменной террасы, на которой размещается стоянка, а также для выявления границ старых раскопов и отвалов, так как эта информация во многом утрачена. Здесь точное знание скоростей электромагнитных волн было крайне важным, так как в археологических задачах требуется высокая точность, и счёт идёт на сантиметры. Этот эксперимент и результаты исследования на памятнике подробно описаны в публикации [Бричева и др., 2016]. Предложенная методика определения скорости при помощи натуральных моделей продемонстрировала хорошие результаты, и оказалась намного менее трудозатратной, чем классические методы определения скорости, при этом результаты более достоверны, поскольку получены путём прямого измерения, а не косвенного.

**Глава 5 «Результаты полевых исследований»** представляет собой детальное описание полевых работ на четырёх типах криогенных объектов, проведённых автором в ходе работы над диссертацией. Сформулируем кратко полученные результаты.

Полевые работы методом георадиолокации на **полигонально-жильных льдах** проводились в Чарской котловине (Россия, Забайкальский край) в августе 2015 года. При выполнении георадиолокационных исследований использовался георадар «ZOND-12e» с экранированной антенной с центральной частотой 300 МГц. Здесь было исследовано

несколько участков с жильными льдами. Результаты опубликованы в работе [Бричева и Станиловская, 2017]. Одним из существенных выводов была технология выделения «скрытых» ледяных жил в разрезе, когда они не выражены на поверхности. Георадарный профиль (Рис. 5) был сопоставлен с космическим снимком, на котором видны полигональные решётки в восточной (правой) части профиля и их отсутствие в западной.

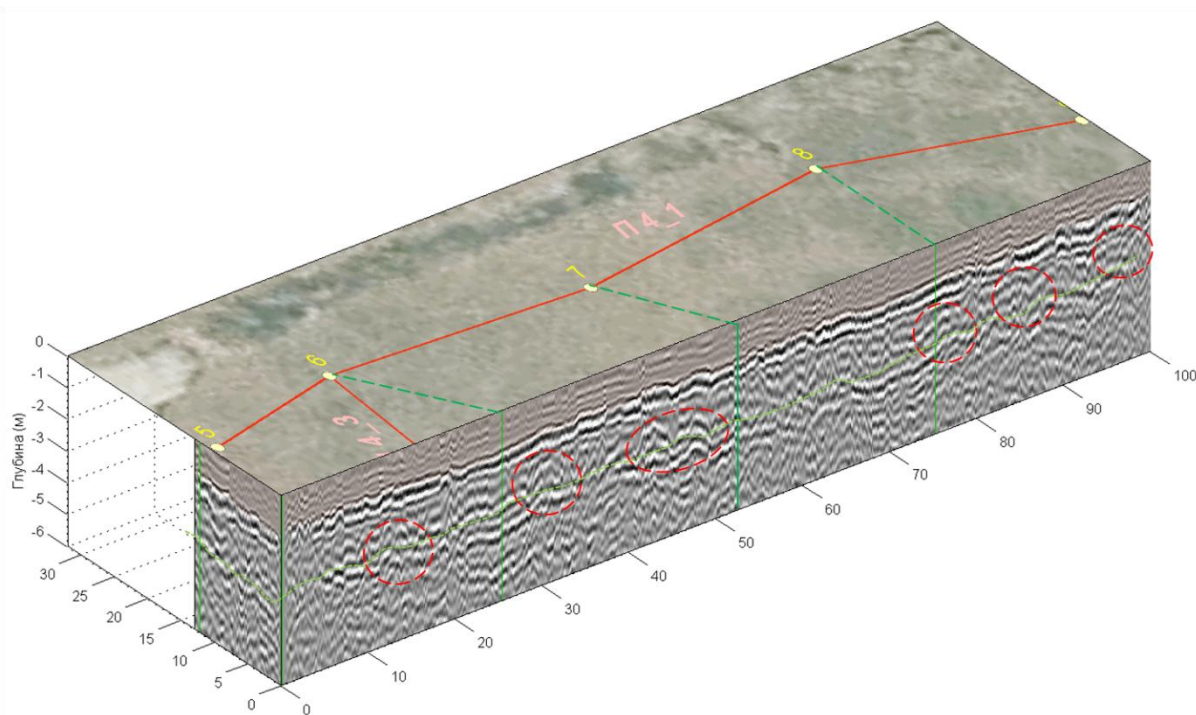
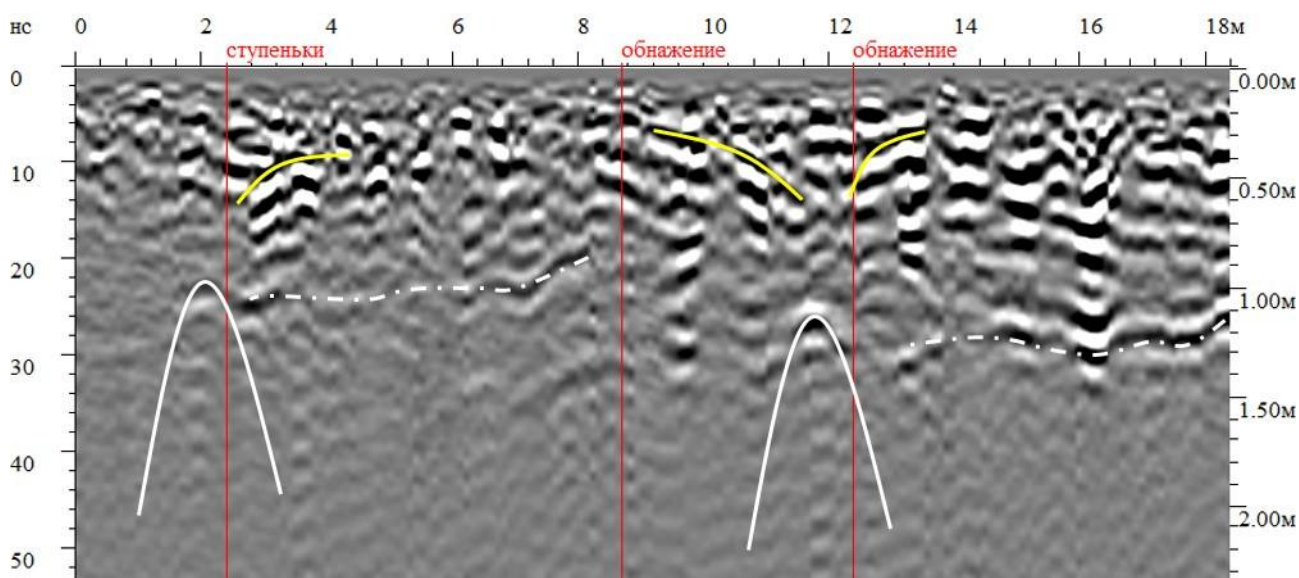


Рис. 5. Профили, сопоставленные со снимком поверхности. Зелёные метки – отрезки 25 м.

Возможно ли выделить какие-либо особенности волновой картины, отвечающие жилам льда в правой части профиля, и проследить их в левой части? Ниже контрастной границы – кровли ММП заметны отражения, по форме отдалённо напоминающие гиперболы дифракции (обведены кружками на Рис. 5). Такие структуры в волновом поле радарограммы могут быть вызваны отражением импульса от объектов сложной формы, превышающих по своим размерам длину волны излучения. Эти структуры выделяются на всей радарограмме, и шаг между ними составляет 10-15 м. Размеры полигонов в восточной части участка работ на составляют в среднем 12.5 м. Восточная половина профиля пересекает несколько таких полигонов. Можно провести соответствие между морозобойными трещинами на снимке и псевдогиперболами на радарограмме. Исходя из этих соображений, мы заключаем, что и в западной части профиля присутствуют ПЖЛ, на снимке не различимые, однако на радарограмме ярко выраженные в виде псевдогиперболических структур ниже кровли мерзлоты.

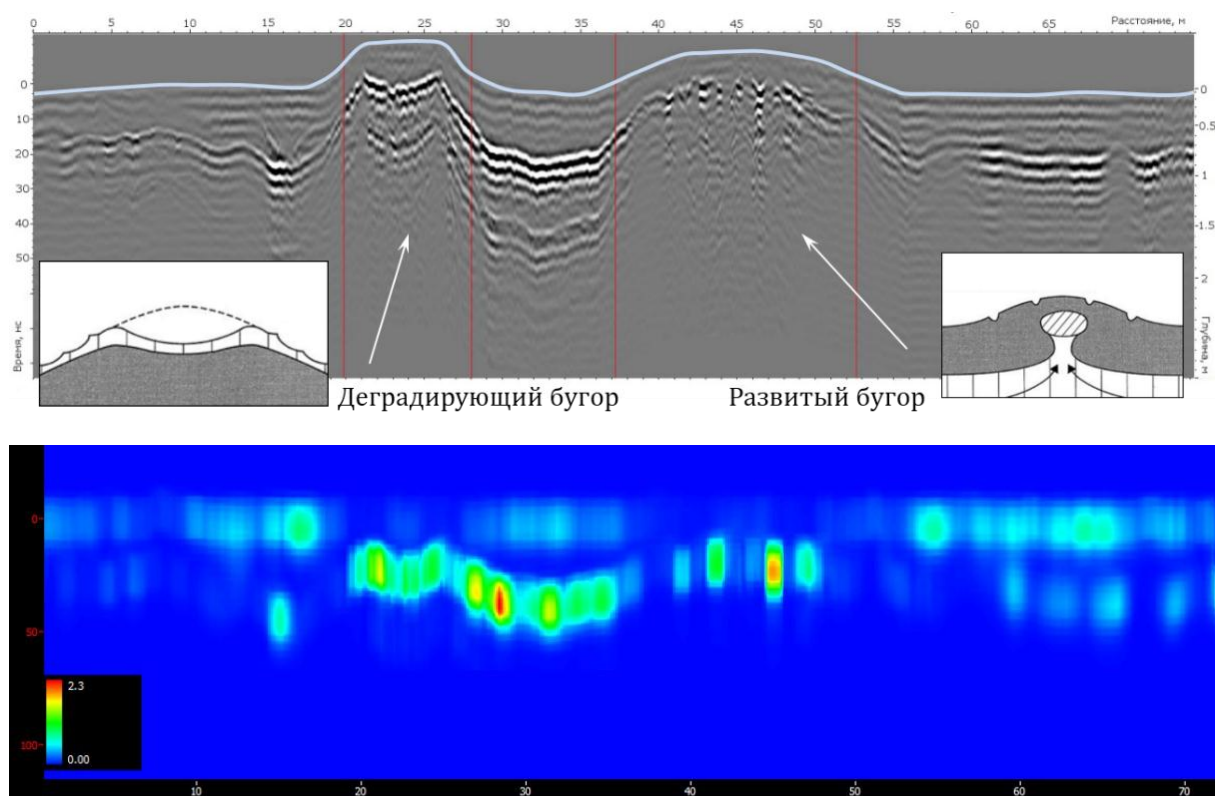
**Псевдоморфоза по ПЖЛ** была изучена автором в ходе экспедиции на Ямал и Гыдан в августе-сентябре 2013 года. Работы проводились на полуострове Явай (северо-западная оконечность п-ва Гыдан). С поверхности Явай практически целиком сложен мёрзлыми осадками четвертичного возраста, верхняя толща, имеющая мощность до 3 м, состоит из переслаивающихся бурых супесей и суглинков. На западном берегу полуострова при проведении геоморфологических исследований [Демидов и др., 2016] было зачищено обнажение мёрзлых пород на береговом обрыве.



*Рис. 6. Радарограмма вдоль профиля над псевдоморфозой. Метки «обнажение» обозначают границы зачищенного обнажения. «Ступеньки» – расчистка для подхода к обнажению. Жёлтым отмечено чашеобразное понижение, штрих-пунктир – кровля ММП. В левой части – предположительно ещё одна псевдоморфоза по ПЖЛ.*

Характерной особенностью разреза является присутствие в нем псевдоморфозы – вытянутой ледяной жилы, заполненной супесью. Верхняя часть псевдоморфозы залегает внутри слоя бурых суглинков, переслаивающихся с песками, подверженных криотурбации. Нижняя часть, ниже 0.5 м, находится в мёрзлом состоянии. Заполнение псевдоморфозы – частично суглинок, частично покровная супесь. Над псевдоморфозой было проведено профилирование, а также зондирование методом георадиолокации. Зондирование позволило оценить по годографу сигнала, отражённого от границы, диэлектрическую проницаемость, равную  $11.6 \pm 0.3$ . Это соответствует супеси с влажностью около 12 %. Псевдоморфоза сама по себе в данном случае слабо контрастна в поле георадара. Отличие между псевдоморфозой и вмещающей породой здесь в чистом виде морфологическое – супесь проникала внутрь клиновидного углубления, образованного вытянувшимся льдом, и над бывшей ледяной жилой образовалась «воронка». Ширина воронки почти 3 м, её борта хорошо видны на профиле в районе 10 и 13 метров (Рис. 6). Это характерное понижение в верхней части разреза не отмечается визуально в

обнажении. Эта особенность радарных данных может быть использована как индикатор, позволяющий отличать псевдоморфозы от ледяных жил. Явным отличием области с псевдоморфозой от границы ММП является сохранение фазы сигнала и его формы. На границе ММП происходит смена фазы с положительной на отрицательную, что объясняется разницей в проводимости талых и мёрзлых пород. Анализ амплитуд показал, что поглощение в слое над псевдоморфозой слабее, чем там, где её нет. Этот вывод возможно объяснить так – область, где происходило растрескивание и последующее заполнение льдом, а затем вмещающими породами, является нарушенной, более рыхлой, вероятно, более воздухомонасыщенной, однако это наблюдение требует детального изучения.



*Рис. 7. Георадарный профиль, проходящий через два бугра пучения (сверху). Красными линиями обозначены границы бугров на поверхности. Двумерное изображение энергии спектра (снизу).*

В рамках экспедиции на Ямал и Гыдан в сентябре 2013 года автором были изучены два **бугра пучения-пинго** на Гыданском полуострове (Россия, ЯНАО). Учитывая высокую детальность, с которой георадиолокация позволяет исследовать подповерхностные структуры, было проведено георадарное профилирование на буграх пучения с целью определения стадии их развития. Внимательный анализ радарограмм позволяет выявить структурные неоднородности в теле бугров. Изучены два бугра пучения, диаметром не превышавшие 10 метров, расположенные рядом друг с другом. Они были покрыты серией параллельных профилей. Кровля ММП здесь имеет явную особенность – поднятие к

поверхности в середине бугра пучения (Рис. 7). Эта особенность была подчеркнута ещё в публикации моих коллег [Ермаков и Старовойтов, 2010]. В центре правого бугра пучения прослеживаются неоднородности границы, так называемая «звнящая запись», что может указывать на наличие трескающегося, тающего льда в центральной части бугра. Форма бугров пучения зависит от их возраста или, точнее, стадии их развития. По характеру отражений на радарограмме можно сравнить возраст этих двух бугров. Так, бугор, отмеченный в правой части радарограммы, ещё подвергается термоэрозии. Бугор в левой части радарограммы имеет чашеобразное понижение в центре, это может быть связано с вытаиванием ледяного тела бугра и тепловой осадкой поверхности. Таким образом, правый бугор «моложе» левого. Анализ динамических атрибутов показал, что энергия и амплитуда над правым, более молодым бугром, ниже, чем над левым. «Разбитость» осей синфазности над правым бугром проявляется и в энергетическом атрибуте. В зимнее время контраст должен стать ещё заметнее, так как СТС будет находиться в мёрзлом состоянии и пропадёт ярко выраженная в амплитудах граница протаивания.

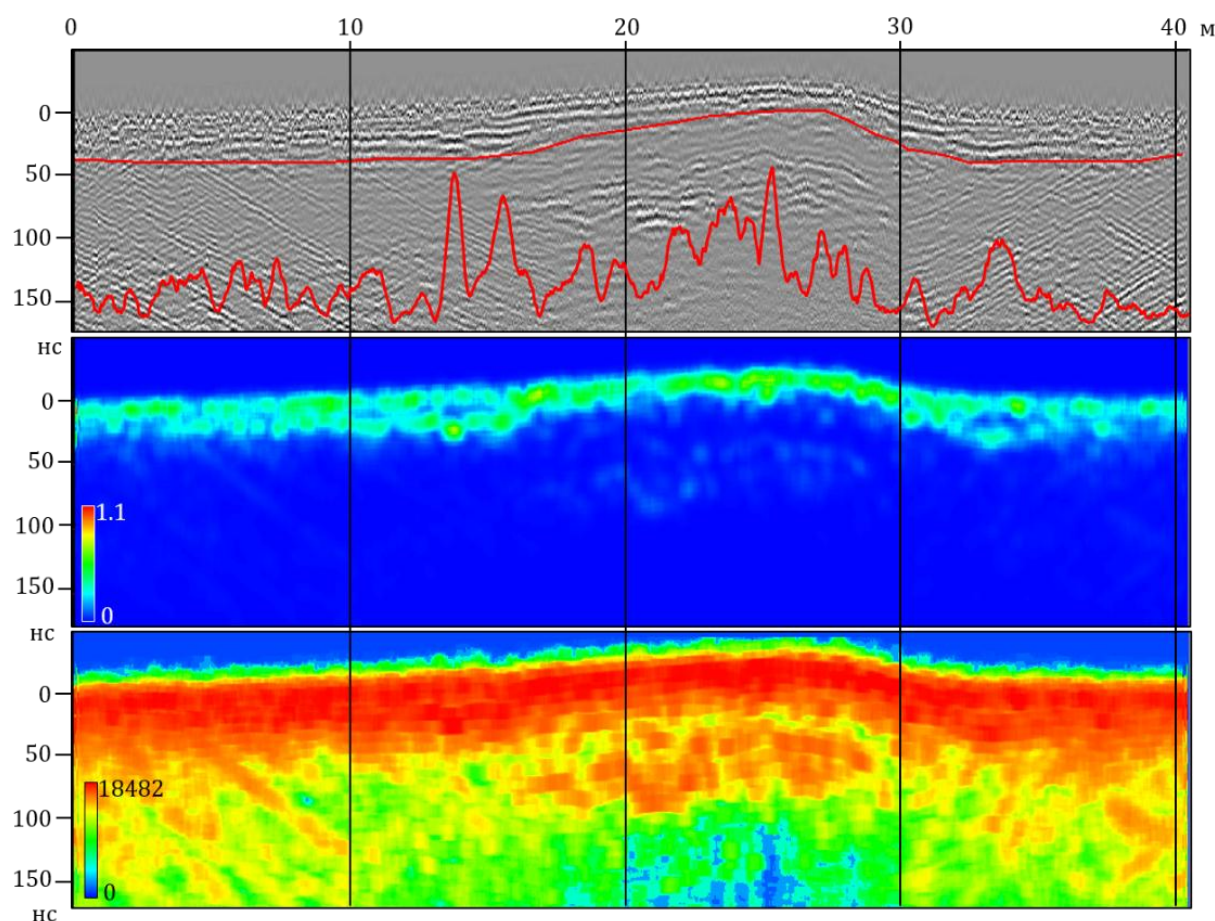


Рис. 8. Георадарный профиль над палъза Peera 2: временной разрез (сверху), красная линия в верхней части – пикировка, вдоль которой в окне 10 нс рассчитывалась энергия (её график приведён в нижней части радарограммы). В середине: двумерное представление энергии записи. Снизу: двумерное представление максимальной амплитуды.

Полевые исследования **бугров-пальза** проводились автором в ходе стажировки в университете Хельсинки (Финляндия) в апреле 2015 года в районе Кильписъярви в Финской Лапландии. Это область островного (прерывистого) распространения вечной мерзлоты. Определяющим фактором формирования пальза здесь является низкая температура воздуха в сочетании с маломощным снежным покровом на некоторых участках. В ходе предыдущих работ [Kohout et al., 2014] было показано, что в зимних условиях возможно выделить подошву мёрзлого ядра по характерной оси синфазности. Были изучены 4 пальза, результаты наиболее характерного из них приведены в диссертации. Мёрзлое ядро в зимних условиях характеризуется сглаженной волновой картиной, небольшие колебания амплитуд могут быть отчасти связаны со шлирами льда внутри мёрзлого ядра. Мёрзлое ядро достаточно хорошо выделяется визуально по кинематическим признакам, однако стоит оценить и динамические характеристики записи. Как видно из Рис. 8, и энергия, и максимальная амплитуда наглядно демонстрируют особенность в середине профиля, непосредственно под бугром. Причём в поле максимальных амплитуд под мёрзлым ядром фиксируются минимальные значения амплитуд.

В заключительной части диссертации в отдельной **Главе 6** сформулированы **методические рекомендации по изучению ряда криогенных объектов методом георадиолокации**. Предлагаемая методика представляет собой серию процедур, последовательное выполнение которых даст наилучший результат решения задачи поиска и определения формы и размеров криогенных объектов. Она включает в себя следующие этапы, подробно рассмотренные в соответствующих главах:

1. **Построение электрофизической модели изучаемого объекта (Глава 3)**
2. **Численное моделирование (Глава 4, разделы 4.3-4.5)**
3. **Физическое моделирование (Глава 4, раздел 4.6)**
4. **«Натурное моделирование» для определения скорости (Глава 4, разделы 4.1-4.2)**
5. **Анализ полевых данных (Глава 5)**

Важным свойством предлагаемой методики является её итерационный характер – полученные в поле данные дополняют и уточняют все этапы. Кроме того, каждый из этапов ценен сам по себе и может применяться не только к криогенным объектам.

## **Заключение**

1. В настоящей работе предложена методика изучения ряда криогенных объектов методом георадиолокации.
2. Проведенный анализ параметров поля высокочастотных электромагнитных волн и характеристик криогенных объектов показал перспективы применения метода георадиолокации для решения поставленных перед исследованием задач.
3. Построенные в диссертации электрофизические модели изучаемых объектов позволяют классифицировать данные объекты в поле электромагнитных волн радарного диапазона.
4. Приведённые результаты численного моделирования для оценки влияния размеров, формы жилы, а также свойств и состояния вмещающей среды, демонстрируют хорошее соответствие с наблюдениями.
5. Результаты физического моделирования показали, что определение формы и размеров криогенных объектов вполне возможно провести по полевым георадарным записям.
6. Комбинация математического моделирования, физического лабораторного и натурного видов моделирования позволяет разработать методику георадиолокационного исследования каждого из рассмотренных в работе криогенных объектов.
7. Динамический анализ радарограмм криогенных объектов необходим не только при обработке конкретных записей, но и позволяет расширить класс используемых в обработке моделей среды с учетом проводимости.

## **Список работ, опубликованных по теме диссертации:**

**Статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:**

1. Бричева С.С., Матасов В.М., Шилов П.М. Георадар в геоэкологических исследованиях при искусственном обводнении торфяников // **Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.** — 2017. — № 3. — С. 76–83.
2. Бричева С.С., Кандинов М.Н., Матасов В.М. Опыт использования георадарных исследований на позднепалеолитической стоянке Авдеево в Курской области. // **Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология**, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), № 4, 2016, с. 132-143
3. Владов М.Л., Бричева С.С., Стручков В.А., Токарев М.Ю. Оценка возможностей лабораторных измерений упругих свойств неконсолидированных осадков с использованием электроискрового источника упругих волн и пьезоэлектрических приемников давления // **Технологии сейсморазведки**, № 3, 2016, с. 114-122
4. Krylov S.S., Bobrov N.Yu, Pryakhina G.V., Bricheva S.S., Ionov V.V. Peculiarities of Distribution and Transformation of Water in the Keret' River Tidal Estuary // **Russian**

**Meteorology and Hydrology**, издательство Allerton Press Inc. (United States), том 39, № 10, 2014, с. 677-684

5. Бричева С.С., Крылов С.С. Георадиолокационные исследования приповерхностных многолетнемёрзлых пород на Гыданском полуострове // **Инженерные изыскания**, (М.), № 9-10, 2014, с. 38-45
6. Бричева С.С., Станиловская Ю.В. Ground-penetrating radar studies on «invisible» ice wedges in Chara depression (Zabaykalsky Krai, Russia) // 13th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2017, **EAGE EarthDoc**.
7. Stephan Schennen, Bricheva Svetlana, Jens Tronicke. Potential of ground-penetrating radar for imaging active layer and ice wedges in permafrost areas // 13th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2017, **EAGE EarthDoc**.
8. Svetlana Bricheva, Stephan Schennen, Julia Stanilovskaya. Prospects of the FDTD modeling tool gprMax for imaging of ice wedges // Proceedings of 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR2017), **IEEE** Edinburgh, United Kingdom.
9. Бричева С.С. Applying of GPR method for shallow subsurface studies in permafrost // 10th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2014, **EAGE EarthDoc**.

#### **Список цитируемой в автореферате литературы:**

- Arcone, S. A., Sellmann P-V., Delaney A. J. Radar detection of ice wedges in Alaska. / CRREL Report — 1982, № 19, pp. 82–43.
- Dallimore, S. R., Davis, J. L., 1992: Ground penetrating radar investigations of massive ground ice; in Ground penetrating radar, ed. J. Pilon; Geological Survey of Canada, pp. 41–48.
- Doolittle, J. A., M. A. Hardisky, S. Black. A Ground-Penetrating Radar study of Goodream Palsas, Newfoundland, Canada // Arctic and Alpine Research 24, no. 2 (1992): 173–78.
- Yoshikawa, K., C. Leuschen, A. Ikeda, K. Harada, P. Gogineni, P. Hoekstra, L. Hinzman, Y. Sawada, and N. Matsuoka. Comparison of geophysical investigations for detection of massive ground ice (pingo ice). // J. Geophys. Res., 2006, 111, E06S19.
- Watanabe, T., Matsuoka, N. and Christiansen, H. H. (2013). Ice- and Soil-Wedge Dynamics in the Kapp Linné Area, Svalbard, Investigated by Two- and Three-Dimensional GPR and Ground Thermal and Acceleration Regimes. Permafrost and Periglac. Process., 24: 39–55.
- Kohout T., Bučko M.S., Rasmus K., Leppäranta M., Matero I. Non-Invasive geophysical investigation and thermodynamic analysis of a palsa in Lapland, Northwest Finland. // Permafrost & Periglacial Processes, 2014, 25(1): 45-52.
- Schennen S., Jens Tronicke. The potential of common–offset GPR surveying in complex permafrost environments: an example from Northern Siberia. // Proceedings of IWAGPR, 2015.
- Васильчук Ю. К., Васильчук А. К., Станиловская Ю. В. Летние и зимние температуры воздуха в Северном Забайкалье в период формирования голоценовых полигонально–жильных льдов // Криосфера Земли. — 2010, т. XIV, № 2, с.7–22.
- Демидов Н. Э., Баранская А. В., Дурденко Е. В., Занина О. Г., Караевская Е. С., Пушина З. В., Ривкина Е. М., Спирина Е.В, Спенсер Р. Биогеохимия мёрзлых толщ арктического побережья полуострова Гыдан. // Проблемы Арктики и Антарктики — 2016. №3 (109). С. 34–49.
- Ермаков А. П., Старовойтов А. В., Владов М. Л. Георадиолокационные исследования верхней части разреза при проектировании сейсмических работ в зимнее время // Технологии сейсморазведки. — 2012. — № 2. — С. 89–97.