

*На правах рукописи*



**ЦИБИЗОВ Леонид Валерьевич**

**АНОМАЛИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
НАД ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫМИ ЛЬДАМИ  
(НА ПРИМЕРЕ ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА  
В ДЕЛЬТЕ Р. ЛЕНА)**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных  
ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН.

**Научный руководитель:**

**Дядьков Пётр Георгиевич**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент.

**Официальные оппоненты:**

**Омельяненко Александр Васильевич,**

доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, главный научный сотрудник;

**Орехов Александр Николаевич,**

кандидат геолого-минералогических наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доцент кафедры геофизики.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Тюмень.

Защита состоится 18 апреля 2018 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), в конференц-зале.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3,

факс (8-383) 330-28-07,

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/commettee/Tsybizov2017>

Автореферат разослан 20 февраля 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.г.-м.н., доцент



Н.Н. Неведрова

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена развитию геофизических методов изучения криолитозоны. Полигонально-жильные льды широко распространены на значительных территориях Якутии, Чукотки и Аляски и являются объектом научных и инженерных исследований в этих районах. Выявление и картирование полигонально-жильных льдов при решении задач мерзлотной съёмки выполняется при помощи разнообразных геофизических методов, среди которых метод магнитометрии, несмотря на ряд преимуществ, практически не применяется. В данной работе на основе численного моделирования и полевых наблюдений показана связь полигонально-жильных льдов с магнитными аномалиями и обосновывается применение метода прецизионной магнитной съёмки для их поиска и картирования.

**Объектом исследования** является магнитное поле над полигонально-жильными льдами в многолетнемёрзлых отложениях.

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью развития геофизических методов поиска полигонально-жильных льдов для решения научных и инженерных задач в криолитозоне. Полигонально-жильные льды (иногда также называемые повторно-жильными льдами, сокращённо ПЖЛ) — ледяные структуры в криолитозоне, формирующиеся в результате многократного морозного растрескивания грунтов и заполнения трещин льдом. Для решения ряда инженерных и научных задач необходима информация о распределении ПЖЛ в верхнем слое многолетнемёрзлых отложений (на глубине первых метров), наиболее подверженном воздействию природных и техногенных процессов. Так, гидрологические и, в конечном счёте, климатические процессы в криолитозоне в существенной степени связаны с деградацией многолетнемёрзлых пород по ледяным жилам. Кроме того, информация о расположении ледяных жил, скрытых под слоем осадков, крайне важна при проектировании объектов инфраструктуры. Лёссовидные отложения, включающие системы полигонально-жильных льдов и получившие в литературе название «едома» широко распространены на равнинах Якутии, Чукотки и Аляски. Для этих территорий наиболее актуальна задача выявления ледяных жил. Для решения подобных задач успешно применяются разнообразные геофизические методы, при этом роль магнитометрии среди них выглядит сильно недооцененной. Несмотря на то, что возможность обнаружения подземных льдов при помощи прецизионной магнитной съёмки известна относительно давно, метод до сих пор не получил экспериментального обоснования и широкого распространения. Современные методы и аппаратура прецизионной

магнитной съёмки имеют ряд преимуществ при изучении распределения льда в многолетнемёрзлых отложениях в сравнении с большинством применяемых в настоящий момент геофизических методов: высокая скорость съёмки, слабая зависимость магнитных свойств многолетнемёрзлых пород от их солёности и температурного состояния, а также отсутствие необходимости контакта с поверхностью. Стоит также отметить, что развитие беспилотных магнитометрических технологий в скором времени, вероятно, позволит реализовать более высокие скорости съёмки, особенно в условиях тундры (спокойный рельеф и низкая залесённость). Всё вышперечисленное делает магнитометрию одним из перспективных методов для поиска и определения структуры ПЖЛ, что, в свою очередь, требует изучения связи между строением ПЖЛ и аномальным магнитным полем над поверхностью содержащих их многолетнемёрзлых отложений.

**Цель исследования** – теоретически и экспериментально обосновать применение метода прецизионной магнитной съёмки для локализации полигонально-жильных льдов.

**Задачи исследования:**

1. Оценить интенсивность и пространственное распределение аномального магнитного поля над полигонально-жильными льдами в многолетнемёрзлых породах при различных параметрах среды на основе численного моделирования.

2. Экспериментально определить интенсивность и особенности пространственного распределения аномалий магнитного поля над многолетнемёрзлыми отложениями с полигонально-жильными льдами в дельте р. Лена и сравнить их с синтетическими аномалиями над моделями среды, построенными по геологическим данным.

**Фактический материал и методы исследования**

В основу работы положены данные полевых магнитометрических измерений в дельте р. Лена, результаты исследования физических свойств образцов многолетнемёрзлых пород и результаты численного моделирования магнитного поля над полигонально-жильными структурами.

При исследовании применялись следующие экспериментальные и численные методы:

- прецизионная магнитная съёмка участков многолетнемёрзлых отложений в дельте р. Лена для выявления магнитных аномалий, соответствующих полигонально-жильным структурам различного типа;
- измерение магнитной восприимчивости (каппаметрия) и оценка содержания льда в образцах многолетнемёрзлых пород;

- конечно-элементный метод численного моделирования магнитных аномалий над полигонально-жильными структурами - для предварительной оценки магнитных аномалий над ПЖЛ, а также для интерпретации результатов прецизионной магнитной съёмки.

Прецизионная магнитная съёмка выполнялась на основе известной методики [Инструкция по магниторазведке..., 1981] с учётом ряда методических приёмов, применяемых при археологических исследованиях в ИНГГ СО РАН [Археогеофизические исследования..., 2015; Мультидисциплинарные археолого-геофизические..., 2016] и позволяющих эффективно использовать преимущества современной магнитометрической аппаратуры. Для съёмки применялся квантовый магнитометр GSMP-35g [GEM GSMP Potassium Magnetometer...] и магнитовариационная станция MMPOS-1 [Магнитометр MMPOS-1...].

Измерение магнитной восприимчивости образцов многолетнемёрзлых пород проводилось в полевых условиях капнаметром КТ-5 [КАРРАМЕТЕР model КТ-5..., 1980]. Влажность оценивалась в лабораторных условиях на основе разницы масс мёрзлых и сухих образцов.

Численное моделирование выполнялось при помощи программного пакета COMSOL Multiphysics v. 4.4, реализующего метод конечных элементов. Для расчётов магнитных аномалий решалась трёхмерная прямая задача магниторазведки. Для объяснения наблюдаемых магнитных аномалий расчёты синтетических аномалий производились в пределах классов моделей, обоснованных геологической информацией и результатами исследования образцов.

При выборе ключевых участков для съёмки были использованы результаты полевых исследований Российско-Германской экспедиции о строении и составе многолетнемёрзлых отложений дельты р. Лена [Schneider, Grosse, Wagner, 2009; Большианов и др., 2013]. При анализе и интерпретации данных полевых наблюдений также применялись данные аэрофотосъёмки высокого разрешения (3-5 см/пиксель) и построенная на их основе цифровая модель рельефа, позволяющая определять разность координат точек рельефа с погрешностью 25 см на расстояниях до десяти метров.

### **Защищаемые научные результаты**

1. Оценены интенсивность и пространственное распределение аномального магнитного поля над полигонально-жильными льдами (ПЖЛ) в многолетнемёрзлых породах при различных параметрах среды на основе численного моделирования. Интенсивность синтетических магнитных аномалий в типичных моделях среды с ПЖЛ составляет от 1 до 10 нТл на высоте 1 м над поверхностью однородного слоя отложений,

перекрывающих жилы, мощностью от 2-х до 4-х метров.

2. Экспериментально установлены интенсивность и пространственное распределение аномалий магнитного поля над многолетнемёрзлыми отложениями с ПЖЛ в дельте р. Лена. Наблюдаемые отрицательные аномалии над ПЖЛ составляет для разных участков от 2,5 до 10 нТл, что на порядок превышает погрешность прецизионной магнитной съёмки на этих участках и подтверждает применимость метода для поиска ПЖЛ. Показано соответствие наблюдаемых аномалий синтетическим над типичными моделями ПЖЛ ледового комплекса о. Курунгнах, построенными по геологическим данным.

### **Научная новизна**

Впервые выполнены расчеты магнитных аномалий (или аномального магнитного поля) над трёхмерными моделями многолетнемёрзлых отложений с полигонально-жильными льдами различной конфигурации.

Метод прецизионной площадной магнитной съёмки впервые применён для локализации полигонально-жильных структур в криолитозоне.

### **Личный вклад соискателя**

Лично соискателем проведены: численные оценки аномалий магнитного поля над полигонально-жильными льдами, полевые магнитометрические измерения в дельте р. Лена, интерпретация данных с применением численного моделирования, анализ результатов, обоснование применения магнитометрии в зонах распространения полигонально-жильных льдов, выявление преимуществ и ограничений метода. Исследование магнитной восприимчивости и влажности образцов многолетнемёрзлых пород выполнены силами сотрудников экспедиции ИНГГ СО РАН при участии соискателя.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Полученные результаты позволяют интегрировать прецизионную магнитную съёмку в комплекс геофизических методов, применяемых при решении научных и инженерных задач в районах криолитозоны, содержащих полигонально-жильные льды. Детальное картирование ледяных жил даёт возможность оценить льдистость верхней части многолетнемёрзлых отложений, что является необходимым при построении прогнозов термокарстовых и термоэрозийных процессов в этих отложениях. Кроме того, информация о расположении и мощности ледяных жил повышает представительность выборки при отборе образцов таких отложений. Исследование строения полигонально-жильных льдов вблизи объектов инфраструктуры даёт дополнительные данные для прогноза деградации многолетнемёрзлых пород. В комплексе с электротомографией, георадиолокацией и другими геофизическими

методами прецизионная магнитометрия позволяет снизить неоднозначность интерпретации благодаря избирательной чувствительности метода к соотношению в объёме средне- и слабомагнитных пород (мёрзлый грунт и лёд) при низкой чувствительности к температуре, анизотропии льда, солёности и т.п.

Основным ограничением метода является в отдельных случаях возможная низкая магнитная восприимчивость многолетнемёрзлых пород (менее  $10^{-4}$  СИ, но это значение может варьироваться в зависимости от геометрии объектов), при которой существующая погрешность съёмки (около 1 нТл) слишком велика для уверенного выявления в них полигонально-жилных льдов, либо такая съёмка потребует повышенной точности, что существенно скажется на скорости.

### **Достоверность полученных результатов**

Магнитометрические измерения проводились по методике, многократно проверенной при использовании метода прецизионной магнитометрии в археологических исследованиях. Качество данных магнитной съёмки контролировалось при помощи контрольных измерений. Качество измерений магнитной восприимчивости контролировалось повторными замерах. Методы численных расчётов предварительно тестировались автором: численные решения прямых задач магниторазведки для простых тел сравнивались с аналитическими решениями. При расчёте аномального магнитного поля оценивалось влияние параметров модели путём их изменения на малые величины. Полевые исследования были выполнены в первую очередь на тестовом участке, положение ледовой жилы на котором было известно, что позволило оценить информативность и достоверность метода. Результаты интерпретации соответствуют геологическим данным о строении исследуемых участков.

### **Апробация результатов работы**

Результаты исследований были представлены на международных конференциях и семинарах: 11-й Международной конференции по мерзлотоведению (Германия, г. Потсдам, 2016) и Международной конференции по мерзлотоведению «Криосфера Земли: прошлое, настоящее и будущее» (Россия, г. Пушино, 2017), отчётной сессии проекта CarboPerm «Mid-term meeting on achievements and further steps» (Германия, г. Гамбург, 2015), конференции аспирантов и молодых учёных «PhD Meeting» (Германия, г. Гюльпе, 2015), расширенных лабораторных семинарах ИНГГ СО РАН.

### **Публикации автора по теме диссертации**

Всего по теме диссертации опубликовано 2 статьи в рецензируемых научных журналах, из которых один входит в перечень рецензируемых

изданий, определенных Высшей аттестационной комиссией («Проблемы Арктики и Антарктики») и один в базу данных Scopus («Near Surface Geophysics»).

Работа выполнена в Лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

### **Структура и объём работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 118 наименований. Полный объем диссертации 113 страниц, включая 67 рисунков и 5 таблиц.

Первая глава содержит описание известных методов исследования полигонально-жильных льдов геофизическими методами.

Вторая глава посвящена численным оценкам магнитных аномалий над полигонально-жильными льдами.

В третьей главе представлены результаты и интерпретация полевых наблюдений на участках многолетнемерзлых отложений в дельте р. Лена.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, к.г.-м.н. Дядькову П. Г. за ценные советы и помощь в работе над диссертацией, к.г.-м.н. Оленченко В. В. за критику и поддержку на всех этапах работы, д.г.-м.н. Кожевникову Н.О., Василевскому А. Н., к.г.-м.н. Семакову Н. Н., д.г.-м.н. Неведровой Н. Н., д.т.н. Ельцову И. Н., к.ф.-м.н. Аюнову Д. Е. и к.ф.-м.н. Козловой М. П. за конструктивные замечания и обсуждение научно-методических аспектов работы. Автор признателен Русалимовой О. А., Фаге А. Н., членам отряда ИНГГ «Самойловский», Карпенко В. В., а также Ph. D. A. Morgenstern, Ph. D. G. Grosse, и Ph. D. P. Overduin за помощь в полевых работах и осмыслении результатов.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Глава 1. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

В главе 1 приведены общие сведения о физических свойствах многолетнемерзлых пород и выполнен анализ мирового опыта исследования криолитозоны геофизическими методами [Методика мерзлотной съёмки..., 1979; Рекомендации по комплексированию..., 1987; Scott, Sellmann, Hunter, 1990; Зыков, 2007; Advances in geophysical methods..., 2008; Hauck, Kneisel, 2008; Watanabe, Matsuoka, Christiansen, 2012; Advancements in the measurement..., 2016;], особое внимание уделено изучению полигонально-жильных льдов и применению магнитометрии. Электрофизические свойства многолетнемерзлых пород

тесно связаны с их влажностью, температурой и содержанием солей [Фролов, 2005]. Это открывает широкие возможности для применения геоэлектрических и электромагнитных методов, таких как электротомография [Internal structure and conditions..., 2008; Hauck, 2013; Kneisel, Emmert, Kastl 2014; Geophysical surveys, permafrost conditions..., 2015; Banville, Fortier, Dupuis, 2016; Geophysical and cryostratigraphic investigations..., 2016; Geophysical estimation of shallow permafrost..., 2016], георадиолокация [Detection of subsurface permafrost..., 2001; Application of ground-penetrating radar..., 2007; Омеляненко, Саввин, Прудецкий, 2009; Бричёва, Крылов, 2014; 3D ground-penetrating radar imaging..., 2016; Brycheva, Stanilovskaya, 2016] и электромагнитное зондирование [Крылов, Бобров, 2002; Resistivity structures..., 2006; Prospecting frost-wedge pseudomorphs..., 2006; Korhonen, Ruskeeniemi, Lehtimaki, 2009; Airborne electromagnetic imaging..., 2012]. Особо следует отметить метод бесконтактного электропрофилирования, эффективного в условиях риолитозоны [Нахабцев, Сапожников, Яблучанский, 1985; Fundamentals of the capacitive..., 2006; Груздев, 2017] Обратная сторона чувствительности геоэлектрических методов к различным свойствам многолетнемерзлых пород заключается в том, при интерпретации бывает сложно разделить влияние этих факторов на измеряемые величины (удельное электрическое сопротивление или диэлектрическую проницаемость). Сейсмические методы применяются для для оценки механических свойств грунтов, определения глубины и характера залегания границ многолетнемерзлых пород, выявления ледяных массивов и таликов [Результаты изучения геокриологических..., 2010; Скворцов, Садуртдинов, Царев, 2014], также известны экспериментальные работы – сейсмическая томография с применением проникающего виброисточника [Seismic cone penetration test..., 2004] и мониторинг активного слоя методом сейсмической интерферометрии [Permafrost Active Layer..., 2015]. В литературе описаны случаи применения гравиметрии при изучении подземных льдов [Гладкий, Лобанов, 1978; Massive Ice and Ice-Rich Soil Detection..., 2015], но при относительной простоте интерпретации и очевидной связи состава многолетнемерзлых пород с их плотностью метод характеризуется высокими требованиями к аппаратуре и методике полевых наблюдений. Дистанционное зондирование обладает большой перспективой и интенсивно развивается [Ermolin, De Angelis, Skvarca, 2002; Remote sensing of glacier..., 2008; Remote sensing of permafrost..., 2015]. Метод позволяет получать информацию на значительной территории, но результативность зависит от особенностей поверхности, которые не всегда адекватно отражают строение многолетнемерзлых толщ и сильно подвержены влиянию экзогенных факторов.

Метод магнитометрии весьма развит в области малоглубинных исследований и широко применяется в археологических [Becker, Fassbinder, 2001; Kvamme, 2006] и почвенных [Коснырева, 2007; Allred et al., 2008] исследованиях, при этом известно лишь несколько публикаций по применению его для изучения многолетнемёрзлых отложений [Матушкин, 1982; Отчёт по теме 110К-89..., 1991; Hodgetts, Dawson, Eastaugh, 2011; Wolff, Urban, 2013; Combined Geophysical Approach..., 2015], в том числе реликтовых [Картирование реликтовых криогенных..., 2011]. Проводились прецизионные измерения аномалий магнитного и гравитационного поля над полигонально-жильными льдами [Мельников, Гладкий, Лобанов, 1974]. Метод обладает рядом преимуществ в сравнении с геоэлектрическими методами: не требуется контакт с поверхностью, есть возможность проводить съёмку с высокой скоростью и, что наиболее важно, магнитная восприимчивость многолетнемёрзлых пород зависит, главным образом, от концентрации ферромагнитных минералов, и уменьшается обратно пропорционально влажности пород (т.к. лёд имеет магнитную восприимчивость на уровне  $-10^{-5}$  СИ [Lonsdale, 1949]) и практически не зависит от температуры и содержания солей.

Таким образом, согласно мировому опыту в настоящее время локализация полигонально-жильных льдов производится преимущественно методами электротомографии и георадиолокации, при этом роль магнитометрии в этой области выглядит сильно недооцененной. Развитие этого метода требует исследования связи физических свойств многолетнемёрзлых отложений, включающих полигонально-жильные льды, с аномальным магнитным полем.

## Глава 2. МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ НАД ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫМИ ЛЬДАМИ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Глава посвящена численным оценкам аномалий магнитного поля над полигонально-жильными льдами на примере их типичных моделей, построенных по литературным данным.

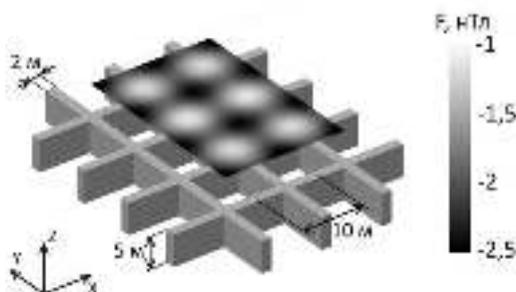
2.1. Методика и программный инструментарий. Численное моделирование выполнялось методом конечных элементов в программном пакете Comsol Multiphysics v.4.4. Подход к моделированию магнитных аномалий в целом соответствовал описанному в работе [Butler, Sinha, 2012]. Намагниченность тел считается однородным, магнитная восприимчивость льда принята равной 0, мёрзлых пород –  $10^{-4}$  СИ, намагничивающее поле – вертикальным, модуль вектора магнитной индукции нормального поля – 60000 нТл. Обоснована необходимость учёта в расчётах пространственного строения полигонально-жильных

льдов путём сравнения результатов расчёта в квазидвумерной и трёхмерной моделях среды.

2.2. Результаты численного моделирования. В данном параграфе приведены расчёты аномалий модуля вектора ветокра магнитной индукции для типичных моделей полигонально-жильных структур:

- модель 1: расстояние между жилами 6 м, высота жил 3 м и ширина 1 м,
- модель 2: расстояние между жилами 15 м, высота жил 10 м, ширина 3 м.

Расчёты выполнены для нескольких случаев с различной мощностью промежуточного однородного слоя отложений, перекрывающих ледовые жилы. Также рассмотрено влияние формы верхних оконечностей ледовых жил на магнитные аномалии. Результат расчёта в одной из моделей представлен на рисунке 1.



*Рисунок 1 – Синтетическая модель распределения аномального модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) над полигонально-жильной структурой на высоте 3 м; ширина жил — 2 м, высота жил — 5 м, расстояние между центрами полигонов — 10 м, магнитная восприимчивость мёрзлого грунта —  $10^{-3}$  СИ*

2.3. Выводы. Приведённые результаты показывают, что с учётом погрешности современной магнитометрической аппаратуры повторно-жильные льды могут быть уверенно выделены методом прецизионной магнитной съёмки на высоте 1 м над уровнем верхней границы жил. На высоте 3 м выделение аномалий, связанных с жилами возможно только при весьма низком (менее 0,5 нТл) уровне помех (в том числе вызванных неоднородностью вышележащего слоя). В модели 2 магнитные аномалии, превышающие 1 нТл, отчётливо прослеживаются до высоты 5 м над верхней границей жил. На высоте 1 м аномалии превышают 20 нТл, т.е. повторно-жильные льды такой геометрии могут быть выявлены даже при значительно меньшем значении магнитной восприимчивости среды. Например, при магнитной восприимчивости мёрзлого грунта  $10^{-4}$  СИ аномалии в некоторых моделях превысят 2 нТл. Учёт трёхмерного

строения полигонально-жильной структуры позволяет значительно скорректировать результаты численных оценок: в зависимости от размеров полигонов и мощности жил разница значений аномалий модуля вектора магнитной индукции в трёхмерной и двумерной моделях может достигать десятков процентов. В зависимости от формы верхних оконечностей ледовых жил в рассмотренных трёх вариантах (вертикальные, сужающиеся и расширяющиеся) изменение амплитуды аномалий составляет около 10%.

### Глава 3. МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ НАД ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫМИ ЛЬДАМИ ПО ДАННЫМ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Глава посвящена экспериментальному исследованию аномалий магнитного поля над участками многолетнемёрзлых отложений с полигонально-жильными льдами на основе данных полевых магнитометрических наблюдений, анализа магнитной восприимчивости и влажности образцов пород, а также сопоставления наблюдаемых аномалий с рассчитанными в моделях среды, построенных по геологическим данным.

3.1. Описание района исследований. Общая площадь дельты составляет приблизительно 30 тыс. кв. км. Различаются западная и восточная её половины: западная часть представлена крупными островами, высота которых составляет первые десятки метров над уровнем моря; восточная часть состоит из множества мелких невысоких островов. Основной сток р. Лена происходит в северном и восточном направлениях. В пределах означенных частей исследователи выделяют более мелкие структурные элементы, отмечая, что дельта р. Лена представляет собой совокупность разновозрастных образований с различным генезисом [Schneider, Grosse, Wagner, 2009; Большианов и др., 2013]. Полевые работы проводились на базе научно-исследовательской станции ИНГГ СО РАН «Остров Самойловский». Для исследования было выбрано три участка:

1. участок полигональной тундры на о. Самойловский,
2. участок на ледовом комплексе на о. Курунгнах,
3. участок на склоне аласа на о. Курунгнах.

Участок исследований на о. Самойловский расположен в зоне торфяных отложений с развитой системой полигонально-жильных льдов эпигенетического типа. Остров Курунгнах в самой верхней части разреза представлен маломощной (как правило, менее 1 м) толщей голоценовых отложений, под которыми находятся плейстоценовые отложения едомы мощностью около 30 м, подстилаемые песками. Благодаря мощным (несколько метров шириной) сингенетическим полигонально-жильным льдам эта толща едомы получила также название «ледовый комплекс» [Palaeoenvironmental dynamics..., 2008; Большианов и др., 2013]. Голоценовые отложения также содержат полигонально-жильные льды, но

эпигенетического типа и существенно меньшей мощности. Голоценовые ледяные жилы имеют ширину порядка 1 м и образуют более мелкую по сравнению с жилами ледового комплекса сеть. Таким образом, полигонально-жильные льды о. Курунгнах образуют, как минимум, двухуровневую структуру: крупные плейстоценовые жилы скрыты слоем голоценовых отложений, по которым, в свою очередь, развиваются более мелкие эпигенетические жилы, внедряющиеся так же и в толщу ледового комплекса. В целом геологическое строение о. Курунгнах близко к строению отложений существенной части криолитозоны – равнин Якутии, Чукотки и Аляски [Попов, 1965; Каплина, 1973; Соломатин, 1974; Washburn, 1979; Томирдиаро, 1980; Gilbert, Kanevskiy, Murton, 2016]: многометровая толща едомы, включающая полигонально-жильные льды, перекрывается сравнительно тонким слоем голоценовых осадков. По этой причине о. Курунгнах был выбран в данной работе в качестве полигона для исследования связи полигонально-жильных льдов с магнитными аномалиями на поверхности. Результаты исследования могут быть применимы к весьма обширной территории, представляющей научный и промышленный интерес. Первые два участка весьма хорошо изучены российскими и германскими экспедициями и полевые исследования на них проводились с расчётом на возможность привлечения этих данных для верификации. Третий участок – термокарстовая впадина («алас») на о. Курунгнах практически не изучался ранее и представляет интерес с точки зрения как апробации методики так и получения новых данных о строении верхней части отложений. На рисунке 2 приведена спутниковая фотография района исследования.



*Рисунок 2 – Участки исследований: 1 – на мёрзлых торфяных отложениях, 2, 3 – на ледовом комплексе и на склоне аласа*

3.2. Методика и аппаратура. В процессе полевых исследований проводилась магнитная съёмка на выбранных участках, а исследование образцов многолетнемёрзлых пород с целью установления типичных значений их магнитной восприимчивости и объёмной влажности для интерпретации данных магнитной съёмки. Интерпретация проводилась с применением численного моделирования на основе геологической информации.

3.2.1. Магнитная съёмка. Метод прецизионной магнитометрии представляет собой особо точные измерения приращений модуля вектора магнитной индукции на небольшой площади, гарантирующие уверенное выделение слабых (10 нТл и менее) аномалий. Съёмка выполнялась по схеме, аналогичной применяемой в археомагнитных исследованиях [Becker, Fassbinder, 2001; Kvamme, 2006; Мультидисциплинарные археолого-геофизические..., 2016] с применением магнитометра GSMP-35g [GEM GSMP Potassium Magnetometer...] и магнитовариационной станции ММПОС-1 [Магнитометр ММПОС-1...]. Погрешность определения аномальных значений модуля вектора магнитной индукции составила: для участка 1 (о. Самойловский) - 0.25 нТл, для участка 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах) - 0.3 нТл, для участка 3 (алас, о. Курунгнах) - 1 нТл.

3.2.2. Исследование образцов. Отбор проб производился при помощи стальной трубы внутренним диаметром 34 мм, вбиваемой кувалдой в грунт. Отбирались образцы по 10 см до глубины 1 м. Измерение магнитной восприимчивости производилось на образцах мёрзлого грунта при помощи каппаметра КТ-5 [КАППАМЕТЕР model КТ-5...] сразу после их изъятия из пробоотборника.

3.2.3. Численное моделирование. Основные аспекты моделирования магнитных аномалий аналогичны описанным в разделе 2.1. На основе геологической информации задавались исходные модели с рядом параметров, таких как магнитная восприимчивость мёрзлого грунта, ширина ледяных жил и т.п. Параметры варьировались в различных комбинациях в пределах дискретного набора значений, допустимых с точки зрения физического смысла модели и геологической информации. Результаты расчётов с разными комбинациями параметров сравнивались с данными полевых наблюдений.

3.3. Результаты полевых наблюдений и интерпретация.

3.3.1. Участок 1: о. Самойловский. Участок исследований размером 20×24 м расположен в зоне перехода от влажной моховой тундры, покрывающей отложения торфяников, к относительно сухим песчаным отложениям и включает фрагмент полигональной структуры,

образованной повторно-жильными льдами (Рисунок 3).

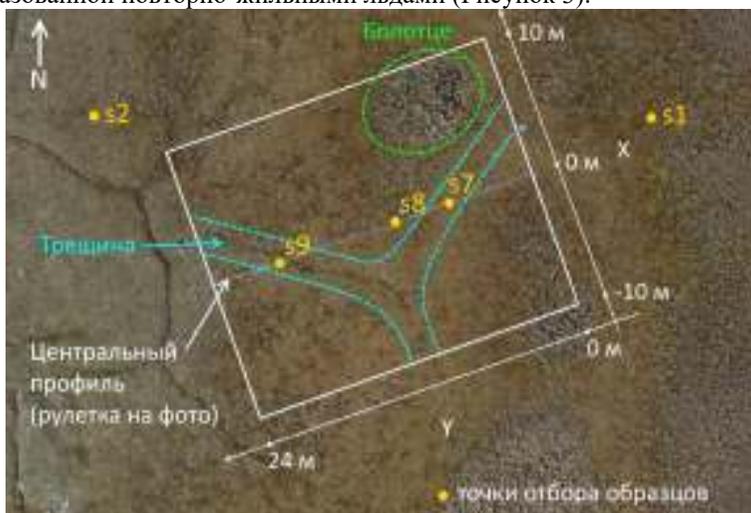


Рисунок 3 – Аэрофотоснимок участка 1 (о. Самойловский); белым прямоугольником отмечены границы участка магнитной съёмки

В аномальном магнитном поле отчётливо выделяется линейная зона отрицательных магнитных аномалий (Рисунок 4).

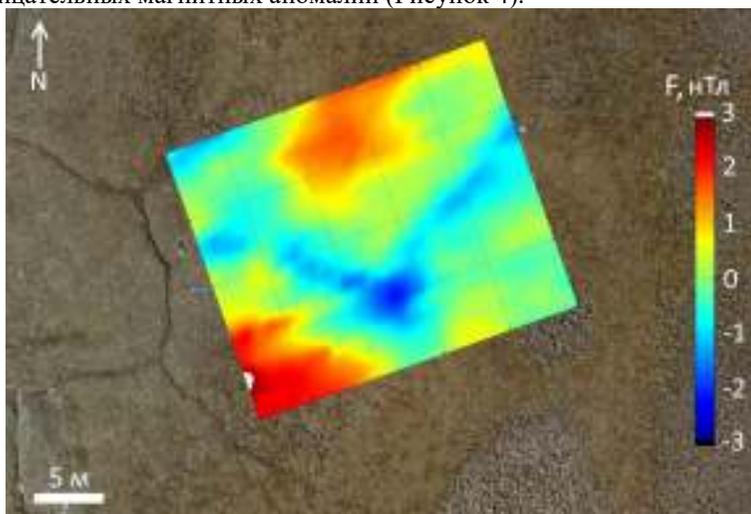


Рисунок 4 – Аномальные значения модуля вектора магнитной индукции на высоте 1.15 м над поверхностью

Эта зона соответствует в плане трещине, которая просматривается на аэрофотоснимке (Рисунок 3), и маркирует ледовую или ледогрунтовую жилу. Расчёт магнитных аномалий над простейшей моделью ледовой жилы шириной 0,5 м в однородной среде с магнитной восприимчивостью  $5 \cdot 10^{-4}$  СИ показал их соответствие наблюдаемым аномалиям лишь непосредственно над жилами. В остальной части участка результаты расчёта существенно расходятся с измеренными значениями. Это связано с высокой степенью неоднородности магнитной восприимчивости среды в верхнем слое (до 30 см), как показало исследование образцов.

3.3.2. Участок 2: ледовый комплекс, о. Курунгнах. Исследуемый участок расположен на поверхности ледового комплекса вблизи эрозионного уступа (Рисунок 5).



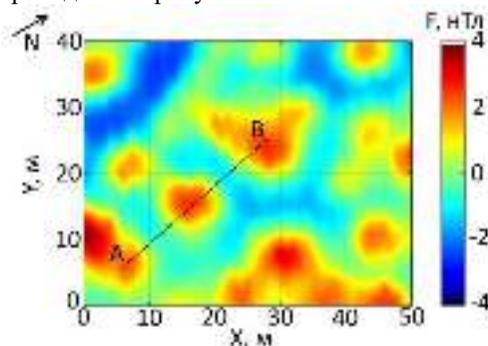
Рисунок 5 – Спутниковый снимок [Картографический сервис HERE...] участка 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах). Белым прямоугольником отмечены границы участка магнитной съёмки

Как видно на фотографии, представленной на рисунке 6, в обнажении отчётливо просматриваются крупные сингенетические ледяные жилы в толще ледового комплекса плейстоценового возраста [Palaeoenvironmental dynamics..., 2008].



*Рисунок 6 – Обнажение ледового комплекса на о. Курунгнах в стенке эрозионного уступа у Оленёкской протоки (фото автора)*

Карта аномальных значений модуля вектора магнитной индукции на высоте 1.15 м, приведена на рисунке 7.



*Рисунок 7 – Положение профиля АВ на карте магнитных аномалий*

В магнитном поле проявляется сеть отрицательных аномалий, связанных, вероятно, с полигонально-жилными льдами. Аномалии имеют различную ширину и амплитуду, при этом наблюдается некоторая иерархия в их распределении: более интенсивные отрицательные аномалии образуют крупную сеть, ячейки которой в свою очередь разделяются менее интенсивными отрицательными аномалиями. Такая картина может быть следствием двухуровневого строения отложений, что находит подтверждение в работе [Palaeoenvironmental dynamics..., 2008]. Как известно, размер жил связан с размером полигонов [Дубиков, 1966]. В таком случае аномалии от голоценовых жил, имеющих меньший размер и образующих полигоны меньшего диаметра, предположительно

накладываются на аномалии от крупных плейстоценовых жил и образуют наблюдаемую картину. Для интерпретации наблюдаемых аномалий от ледовых жил было рассмотрено несколько моделей. Сравнение результатов расчётов с измеренными значениями выполнялось вдоль профиля АВ, пересекающего границы трёх полигонов (Рисунок 7). Всего было рассмотрено 5 трёхмерных моделей, описывающих различное строение ледовых жил. Модель 1 – однослойная с плавно изменяющейся  $\kappa(x,y)$ , модели 2-4 – двухслойные с регулярной полигональной структурой, учитывающие различные варианты геологического строения многолетнемёрзлых толщ с полигонально-жилыми льдами и магнитную восприимчивость мёрзлых пород. Одна из моделей в разрезе представлена на рисунке 8.

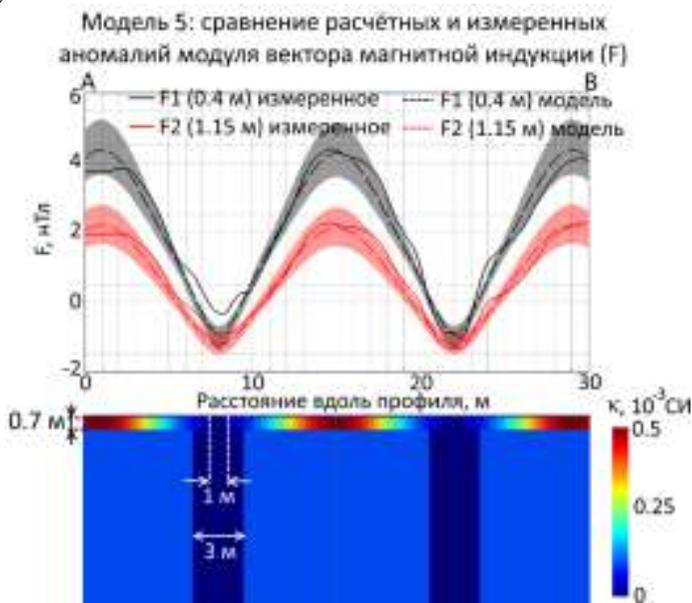
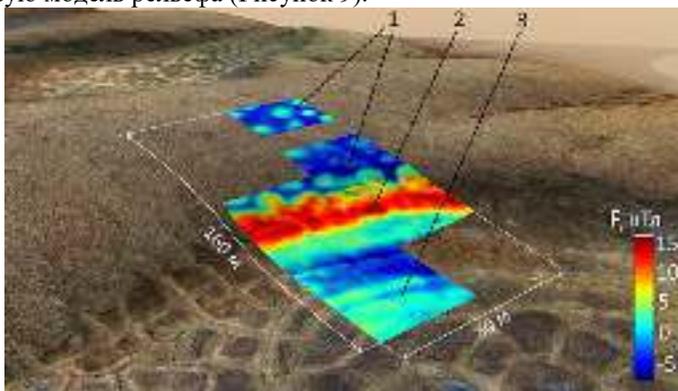


Рисунок 8 – Сравнение аномалий модуля вектора магнитной индукции, измеренных на участке 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах), с рассчитанными в модели 5. Разрез модели представлен в нижней части рисунка. Полупрозрачными областями (серым и красным цветом) указаны зоны разброса рассчитанных значений при слабом изменении параметров модели (см. раздел 3.2.4)

Эта модель наиболее отвечает геологической информации об объекте: ширина жил, берущих начало в верхнем слое (голоценовые отложения),

составляет 1 м, ширина жил в нижнем слое (плейстоценовые отложения) составляет 3 м, мощность верхнего слоя составляет 0,7 м, при этом магнитная восприимчивость имеет радиальное распределение в пределах каждого полигона, уменьшаясь от его центра к краю. Такое распределение магнитной восприимчивости могло возникнуть в результате криотурбации и гравитационной дифференциации вещества в пределах полигонов [Hallet, Allard, 1998; Storage and transformation..., 2015]. Различное протекание окислительных процессов вследствие накопления воды во впадинах микрорельефа также могло послужить причиной неоднородности распределения ферромагнитных минералов [Mineral transformations..., 2003].

3.3.3. Участок 3: алас, о. Курунгнах. Участок расположен на склоне дренированного аласа. На дне аласа отчётливо видны полигональные структуры. Склон аласа покрыт солифлюкционными отложениями, полигональные структуры на нём не выделяются ни зрительно ни в микрорельефе. Карта аномальных значений модуля вектора магнитной индукции и аэрофотоснимок были наложены для наглядности на цифровую модель рельефа (Рисунок 9).



*Рисунок 9 – Карта магнитных аномалий и аэрофотосъёмка, наложенные на цифровую модель рельефа: 1 – аномалии, предположительно связанные с полигонально-жильными льдами ледового комплекса; 2 – зона повышенных магнитных аномалий поперёк склона; 3 – аномалии, связанные с новообразованными ледовыми жилами на дне аласа (полигоны отчётливо видны на фотоснимке)*

Полигонально-жильная структура ледового комплекса под слоем солифлюкции отчётливо проявляется в магнитном поле (отметка 1 на рисунке 9), кроме того, выявлена зона положительной аномалии, которая

тянется поперёк склона (отметка 2 на рисунке 9). Образцы, отобранные в этой зоне с глубин до 1 м, имеют повышенные значения магнитной восприимчивости (до  $2 \cdot 10^{-3}$  СИ).

3.3.4. Анализ и обобщение результатов. Выполненные измерения показали на всех трёх исследованных участках связь отрицательных магнитных аномалий с ледяными жилами. Магнитные аномалии на участках 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах) и 3 (алас, о. Курунгнах) - сходные между собой, и отличаются от аномалий на участке 1 (о. Самойловский). Это объясняется различиями строения полигонально-жилых льдов о. Самойловский и о. Курунгнах вследствие их различного генезиса. Несмотря на воздействие термокарстового процесса на толщу ледового комплекса на участке 3, которое привело к образованию аласа, на его склонах отчётливо просматриваются магнитные аномалии, связанные с полигонально-жилыми льдами. Размер (около 15 м в диаметре) и амплитуды (5-10 нТл) этих аномалий близки к наблюдаемым на участке 2 - ледовом комплексе, не тронутым термокарстовыми процессами. Не объяснённым остались происхождение и природа положительной магнитной аномалии амплитудой до 20 нТл, наблюдаемой на склоне аласа (участок 3). Полученные модели отложений, содержащих ледовые жилы, лишь частично удовлетворяют данным полевых измерений. Строение полигонально-жилых льдов, вероятно, более сложное, чем предложенное в моделях - в пределах даже небольших участков изменяются ширина и амплитуда аномалий, что особенно хорошо видно на результатах магнитной съёмки на участке 2. Подбор модели для таких участков требует программного инструментария, позволяющего строить трёхмерную геометрию полигонально-жилых льдов с возможностью учёта более сложной конфигурации. Фактором, усложняющим подбор моделей, является неоднородность магнитной восприимчивости (особенно в верхнем слое) и плохая изученность законов распределения ферромагнитных частиц в многолетнемёрзлых отложениях, обладающих полигонально-жилых структурой. Стоит отметить некоторые закономерности, полученные в результате анализа образцов. В верхнем слое (до 30 см) наблюдается наибольшая дисперсия магнитной восприимчивости. Это может быть связано с процессами ежегодного оттаивания верхнего слоя до глубин 30-40 см, в пределах которых и наблюдается наибольшая дисперсия [Baseline characteristics of climate..., 2013]. Кроме того, несмотря на существенный разброс значений магнитной восприимчивости наблюдается её значимая связь с влажностью образцов многолетнемёрзлых пород.

3.4. Выводы. Результаты полевых исследований показывают, что над полигонально-жилыми льдами наблюдаются отрицательные аномалии

модуля вектора магнитной индукции. Проведенные наблюдения позволили подтвердить связь этих аномалий с полигонально-жильными льдами в отложениях торфяников на о. Самойловский и в ледовом комплексе на о. Курунгнах. Модели магнитных аномалий над многолетнемёрзлыми отложениями, основанные на геологических данных и результатах исследования образцов, подтверждают предположение о связи отрицательных аномалий вектора магнитной индукции с ледовыми жилами. Значимая связь объёмной влажности и магнитной восприимчивости многолетнемёрзлых пород даёт основание предполагать, что метод магнитометрии может быть применим не только к выявлению структурных особенностей, таких как полигонально-жильные льды, но и к оценке объёмной влажности отложений. Это применение является перспективным, поскольку содержание льда в многолетнемёрзлой породе в большой степени определяет её механические и температурные свойства, при том что получение состоятельной оценки содержания льда на значительной территории посредством опробования является трудоёмким процессом.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты представленного исследования теоретически и экспериментально показывают связь между структурой полигонально-жильных льдов и аномалиями модуля вектора магнитной индукции над поверхностью многолетнемёрзлых отложений. Исследование основано на численных моделях и данных полевых измерений аномального магнитного поля. Результаты численного моделирования дают оценку интенсивности и размеров магнитных аномалий над полигонально-жильными льдами при различных их размерах и свойствах. Эти результаты представлены автором на конференции [Magnetic measurements..., 2016] и опубликованы в работе [Цибизов, 2017]. Полевые работы выполнены на трёх участках, расположенных в дельте р. Лены. Результаты полевых работ показывают интенсивность и пространственное распределение аномалий модуля вектора магнитной индукции над полигонально-жильными льдами. Данные полевых наблюдений сопоставляются с результатами расчёта магнитных аномалий над моделями, построенными по геологическим данным и результатам исследования образцов. Полевые данные по всем трём участкам опубликованы в сборнике отчётов [Integrated non-invasive geophysical-soil studies..., 2017], результаты интерпретации данных на участке ледового комплекса на о. Курунгнах опубликованы в работе [Tsubizov, Rusalimova, 2017].

Результаты работы обосновывают применимость магнитной съёмки для локализации полигонально-жильных льдов в многолетнемёрзлых отложениях. В комплексе инструментальных наблюдений наиболее

оправданным выглядит применение метода на первом этапе геофизических исследований на местности сразу после методов дистанционного зондирования. В таком случае магнитная съёмка может предоставить в распоряжение исследователя основу для планирования более трудозатратных и информативных методов, таких как электротомография и электромагнитное зондирование.

В сравнении с наиболее распространёнными на сегодняшний день методами изучения криолитозоны - электротомографией и георадиолокацией, преимущества магнитной съёмки заключаются в скорости, независимости от температуры, солёности и анизотропии льда в мёрзлом грунте, отсутствии необходимости контакта с поверхностью, простоте первичной интерпретации. Недостатки метода заключаются в чувствительности магнитометрической аппаратуры к электромагнитным помехам и, как следствие, сложности его применения на крупных промышленных объектах [Дядьков, Цибизов, Борисенко, 2015]. Ограничением метода является в отдельных случаях возможная низкая магнитная восприимчивость многолетнемёрзлых пород, при которой современной точности съёмки может оказаться недостаточно для уверенного выявления в них полигонально-жильных льдов.

Интерес представляют повторные измерения методом магнитометрии в зонах деградации многолетнемёрзлых отложений, таких как термоэрозионные овраги и термокарстовые депрессии [Соломатин, Кузьмин, 1971; Pan-Arctic ice-wedge degradation..., 2016]. Например, вынос минерального материала подземным стоком [Fortier, Allard, Shur, 2007] может быть причиной изменения аномального магнитного поля над таким участком. Ещё одним возможным применением метода является развитие нового подхода к оценке льдистости многолетнемёрзлых отложений, что является актуальным при построении моделей их деградации, а также при строительстве в криолитозоне. Содержание воды в твёрдой и жидкой фазах тесно связано с магнитными свойствами мёрзлых грунтов, что даёт возможность при сопоставлении магнитных моделей со свойствами образцов давать численные оценки распределения льда на основе карты магнитных аномалий. Весьма интересными могут оказаться результаты применения метода магнитных сопротивлений в криолитозоне: в случае возникновения проводящих каналов, связанных с оттаиванием ледовых жил, эти зоны, предположительно, будут источниками повышенных магнитных аномалий. Особенно эффективным этот метод может оказаться в районах с засоленными многолетнемёрзлыми отложениями, таких как п-ов Ямал. Перспективы применения метода связаны с развитием беспилотных носителей геофизической аппаратуры, что может существенно повысить его скорость и расширить условия применимости.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в рецензируемых научных журналах:*

1. **Цибизов Л. В.** Повторно-жильные льды в аномальном магнитном поле / Л. В. Цибизов // Проблемы Арктики и Антарктики. - 2017. - Т. 112. - С. 75-84. (ВАК)

2. **Tsibizov L.** Magnetic imaging of the Kurungnakh Island ice complex upper layer structure, Lena Delta, Russia / L. Tsibizov, O. Rusalimova // Near Surface Geophysics. – 2017. – Т. 15. – №. 5. – С. 527-532. (Scopus)

*Работы, опубликованные в других изданиях:*

3. Integrated non-invasive geophysical-soil studies of permafrost upper layer and aerial high-resolution photography/ **L. Tsibizov** et al. // Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2016, Berichte zur Polar- und Meeresforschung = Reports on polar and marine research, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. 2017. - Т. 709. - С. 56-69.

4. Magnetic measurements in permafrost: Lena delta case study / **L. Tsibizov** et al. // International Conference "Earth's Cryosphere: Past, Present and Future". Pushchino, Russia, June 4-8, 2017. - Pushchino, 2017. - С. 73-74.

5. Magnetic studies in Lena river delta: the results of 2014-2015 fieldworks and future plans / **L. Tsibizov** et al. // Book of Abstracts. XI. International Conference on Permafrost 20–24 June 2016, Potsdam, Germany.- Potsdam, 2016. – С. 969.

6. Дядьков П.Г. Методика учета интенсивных промышленных помех при проведении магнитной съемки / Дядьков П.Г., **Цибизов Л.В.**, Борисенко Д.А. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 13-25 апреля 2015 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": Сб. материалов в 3 т. – Новосибирск, 2015. – Т. 2. – С. 57-62.

7. Археогеофизические исследования в СО РАН, 2013-2015 годы / Эпов М.И., Молодин В.И., Балков Е.В., Дядьков П.Г., Фирсов А.П., Злыгостев И.Н., Вайсман П.А., Евменов Н.Д., Егоров В.Е., Карин Ю.Г., Колесов А.С., Кулешов Д.А., Манштейн А.К., Манштейн Ю.А., Позднякова О.А., Савлук А.В., Селезнев Д.С., Фадеев Д.И., **Цибизов Л.В.** и др. // Мультидисциплинарные методы в археологии: новейшие итоги и перспективы: Материалы международного симпозиума "Мультидисциплинарные методы в археологии: новейшие итоги и перспективы" (г. Новосибирск, 22-26 июня 2015 г.). – Новосибирск, 2017. – С. 405-413.

8. Комплексные геолого-геофизические исследования на арктической научной станции НИС о. Самойловский в дельте р. Лена / И. Н. Ельцов, В. А. Каширцев, Д. Е. Аюнов, А. Н. Фаге, **Л. В. Цибизов**, Д. И. Фадеев // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2015. – № 2. – С. 39-44

Технический редактор Т.С. Курганова

---

Подписано в печать 11.01.2018

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 1,0. Тираж 100. Зак. № 165

---

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3