

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ  
ИМ. А.А. ТРОФИМУКА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

кандидат геол.-минерал. наук, доцент

Дядьков П. Г.

Новосибирск

2017

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Глава 1. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ.....	11
Глава 2. МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ НАД ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫМИ ЛЬДАМИ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	19
2.1. Методика и программный инструментарий.....	21
2.2. Результаты численного моделирования .....	26
2.3. Выводы.....	30
Глава 3. МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ НАД ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫМИ ЛЬДАМИ ПО ДАННЫМ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ .....	32
3.1. Описание района исследований .....	32
3.2. Методика и аппаратура .....	36
3.2.1. Магнитная съёмка .....	36
3.2.2. Исследование образцов.....	42
3.2.3. Численное моделирование .....	44
3.3. Результаты полевых наблюдений и интерпретация.....	45
3.3.1. Участок 1: о. Самойловский.....	45
3.3.2. Участок 2: ледовый комплекс, о. Курунгнах.....	55
3.3.3. Участок 3: алас, о. Курунгнах .....	76
3.3.4. Анализ и обобщение результатов .....	84
3.4. Выводы.....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	90

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	93
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	105
Приложение А. Магнитные вариации в период полевых наблюдений.....	106
Приложение Б. Результаты исследования образцов многолетнемёрзлых пород.....	110

## 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 вышеперечисленное 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 пешеходная магнитная съёмка;
- 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 [Мультидисциплинарные археолого-геофизические..., 2016; Археогеофизические исследования..., 2017] 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 каппаметром КТ-5 [КАППАМЕТЕР 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 расчёты 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 термоэрозионных 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-жильных 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 замерами. 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. Пущино, 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 объём 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 многолетнемёрзлых 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.

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

Главная особенность мёрзлых пород состоит в наличии в них льда в различных формах, что существенно сказывается на их физических свойствах и позволяет применять на этом основании ряд геофизических методов для изучения многолетнемёрзлых отложений. Наиболее распространённым геофизическим методом изучения криолитозоны традиционно является электроразведка на постоянном токе [Рекомендации по комплексированию..., 1987; Зыков, 2007]. Это обусловлено широким диапазоном зависимости электрических свойств мёрзлых грунтов от их состава, микроструктуры, влажности, льдистости и температуры [Фролов, 2005]. Помимо электроразведки на постоянном токе к числу методов, ориентированных на электрофизические свойства среды, можно отнести георадиолокацию, частотное зондирование, метод переходных процессов. Сейсмоакустические методы ориентированы на различия упругих свойств, а гравитационные и магнитные методы - плотности и магнитной восприимчивости мёрзлых пород, соответственно.

Согласно отечественным и зарубежным обзорным работам [Методика мерзлотной съёмки..., 1979; Рекомендации по комплексированию..., 1987; Scott, Sellmann, Hunter, 1990; Зыков, 2007; Advances in geophysical methods..., 2008; Hauck, Kneisel, 2008; Advancements in the measurement..., 2016] геофизические методы находят основное применение в решении таких задач, как картирование участков многолетнемёрзлых толщ (выявление и картирование зон оттаивания, подземных льдов, границ промерзания), а также определение мощности многолетнемёрзлых отложений и изучение их строения. Главной предпосылкой для исследования многолетнемёрзлых отложений геофизическими методами служит зависимость физических свойств многолетнемёрзлых пород от их температурного состояния и состава.

Многолетнемёрзлые породы состоят из минерального и органического

вещества, а также льда, газовых включений и, при некоторых условиях, незамёрзшей воды. Лёд также считается минералом, но в данной работе рассматривается отдельно от минеральной фракции.

Минеральная фракция представлена [Достовалов, Кудрявцев, 1967, с. 101; Ершов, 2002, с. 214]: зёрнами минералов, таких как кварц, полевой шпат, слюда и др.; глинистыми частицами (каолинит, монтмориллонит, гидрослюды); растворимыми в воде минералами, присутствующими в водных растворах в виде солей кальция, магния, натрия и др. В некоторых случаях в многолетнемёрзлых породах могут встречаться кристаллогидраты, представляющие собой соли, содержащие кристаллизационную воду. Физические свойства (электропроводность, диэлектрическая проницаемость, магнитная восприимчивость, плотность) многолетнемёрзлых пород в существенной степени определяются их минеральным составом. Примеси в некоторых случаях также могут иметь решающее значение, например, проводимость пород тесно связана с концентрацией солей, при этом большое значение имеет температурное состояние вещества.

Органическое вещество может как слагать отдельные прослойки, так и входить в состав минеральных образований в виде примесей, при этом вещество может иметь различную степень разложения, что может сказываться на физических свойствах породы. Так, исследователями отмечено понижение магнитной восприимчивости некоторых болотных почв вследствие перехода сильномагнитных соединений железа в гидрокислы в глеевых процессах, происходящих в присутствии органического вещества в условиях высокой влажности [Бабанин, Худяков, 1972; Вадюнина, Бабанин, 1972].

Состояние и поведение воды в многолетнемёрзлых породах представляет собой весьма сложный объект исследований [Достовалов, Кудрявцев, 1967, с. 104]. В первом приближении в составе многолетнемёрзлых пород можно выделить свободную и связанную воду. Вода может находиться в жидком состоянии в некотором диапазоне температур в зависимости от содержания в ней солей. Количество и состояние воды в породе оказывает значительное влияние на её

электрические (вследствие различной подвижности ионов) и механические (известен эффект резкого нарушения устойчивости мёрзлых грунтов при изменении близких к нулю отрицательных температур [Коновалов, 2009]) свойства. Кроме того, количество воды или льда в породе напрямую сказывается на её плотности и магнитной восприимчивости. Всё это располагает к применению комплекса геофизических методов для определения характеристик многолетнемёрзлых отложений, связанных с содержанием в них влаги.

Газовая фаза может быть представлена в многолетнемёрзлых породах включениями воздуха и водяным паром. Объёмная доля газа сильно зависит от состава и влагонасыщенности пород.

Количественное соотношение первых трёх компонент может сильно различаться в зависимости от обстановки формирования и метаморфизма пород. Количество воды определяется, главным образом, солёностью и температурой среды и существенно варьируется в верхнем слое многолетнемёрзлых отложений, подверженных сезонному оттаиванию. Геофизические методы исследования криолитозоны основаны на различии описанных выше физических параметров многолетнемёрзлых пород.

**Электроразведка на постоянном токе** является одним из наиболее разработанных и широко применяемых в криолитозоне методов вследствие тесной связи электрического сопротивления пород с их влажностью и температурным и фазовым состоянием. Метод в различных модификациях позволяет выявлять вертикальные и горизонтальные границы между мёрзлыми и тальными породами, обнаруживать подземные льды и дифференцировать многолетнемёрзлые отложения по льдистости [Internal structure and conditions..., 2008; Nauck, 2013]. Профилирование методом электротомографии широко применяется для решения инженерных задач в криолитозоне: выявления зон возможной деградации, уточнения и локализации особенностей строения многолетнемёрзлых отложений [Geophysical surveys, permafrost conditions..., 2015; Geophysical and cryostratigraphic investigations..., 2016]. В последние годы получило распространение трёхмерное моделирование среды на основе данных электроразведки [Kneisel, Emmert, Kastl

2014; Geophysical estimation of shallow permafrost..., 2016]. Мониторинг состояния многолетнемёрзлых отложений методом электротомографии описан в работе [Watanabe, Matsuoka, Christiansen, 2012]. **Электроразведка методом вызванной поляризации** позволяет эффективно выявить локальные особенности, такие как зоны повышенной льдистости и обводнённые участки [Banville, Fortier, Dupuis, 2016]. К существенным ограничениям электроразведки можно отнести низкую скорость съёмки и необходимость заземления электродов. Кроме того, высокая чувствительность метода к таким свойствам многолетнемёрзлых пород как солёность, гранулометрический состав, микроанизотропия ледяной структуры является одновременно и его недостатком вследствие сложности разделения влияния различных факторов. Необходимо упомянуть весьма перспективный для условий криолитозоны **метод бесконтактного измерения** электрического поля [Нахабцев, Сапожников, Яблчанский, 1985; Fundamentals of the capacitive..., 2006]. Метод лишён недостатков электротомографии на постоянном токе, связанных с проблемой заземления в мёрзлых грунтах и опережает её в скорости, при этом практически не проигрывая в информативности [Груздев, 2017].

**Электромагнитное зондирование** в различных модификациях интенсивно развивалось в последние десятилетия в связи с разработкой аппаратуры и в настоящее время применяется в зависимости от типа установки для определения границ таликов [Resistivity structures..., 2006], расчленения верхней части разреза на отдельные горизонты и выявления локальных особенностей [Крылов, Бобров, 2002; Prospecting frost-wedge pseudomorphs..., 2006], мониторинга техногенной деградации многолетнемёрзлых пород [Фаге, Фадеев, Ельцов, 2017]. Многочастотное зондирование применялось для выявления нижней границы многолетнемёрзлых пород на глубине нескольких сотен метров на территории Канады [Korhonen, Ruskeeniemi, Lehtimäki, 2009]. Проводились эксперименты по картированию кровли подводной мерзлоты при помощи электромагнитного зондирования [Первый опыт электромагнитного зондирования..., 2016]. Важной особенностью метода является возможность не только наземной, но и аэросъёмки [Hoekstra, Sellmann, Delaney, 1975; Airborne electromagnetic and magnetic..., 2011;

Airborne electromagnetic imaging..., 2012].

Отдельно стоит выделить метод **георадиолокации**, получивший широкое распространение и позволяющий с высокой точностью оценивать мощность слоёв верхней части разреза и степень их неоднородности [Detection of subsurface permafrost..., 2001; Application of ground-penetrating radar..., 2007; Омеляненко, Саввин, Прудецкий, 2009; Бричёва, Крылов, 2014; 3D ground-penetrating radar imaging..., 2016]. Неоднократно предлагалось использовать этот метод для поиска скрытых ледяных жил [Arcone, Sellmann, Delaney, 1982; Brycheva, Stanilovskaya, 2016].

**Сейсморазведка** служит преимущественно для оценки механических свойств грунтов, определения глубины и характера залегания границ многолетнемёрзлых пород, выявления ледяных массивов и таликов [Результаты изучения геокриологических..., 2010; Скворцов, Садуртдинов, Царев, 2014]. Помимо традиционного применения сейсмических методов к исследованию многолетнемёрзлых отложений существуют оригинальные подходы, такие как сейсмическая томография с применением проникающего виброисточника [Seismic cone penetration test..., 2004] и мониторинг активного слоя методом сейсмической интерферометрии [Permafrost Active Layer..., 2015].

Метод **микрोगравиметрии** может быть эффективен для выявления крупных ледяных объектов [Massive Ice and Ice-Rich Soil Detection..., 2015] благодаря пониженной плотности льда по сравнению с плотностью большинства пород. Предложен подход к оценке содержания льда в приповерхностном слое многолетнемёрзлых отложений на основе метода [Гладкий, Лобанов, 1978].

**Дистанционные методы** интенсивно развиваются и позволяют оперативно получать информацию о верхней части криолитозоны на значительных территориях [Ermolin, De Angelis, Skvarca, 2002; Remote sensing of permafrost..., 2015]. Наиболее известными являются методы инфракрасной и радиолокационной съёмки, позволяющие получать данные о влажности и температуре пород, оконтуривать участки распространения мёрзлых и талых пород [Remote sensing of glacier..., 2008]. К недостаткам можно отнести зависимость эффективности этих

методов от растительного или снежного покрова, облачности, а также других погодных условий.

**Комплексирование методов** позволяет не только получить разностороннюю информацию об объекте, но и в некоторых случаях существенно повысить информативность каждого из применяемых методов за счёт совместной интерпретации данных. Комплексирование георадиолокации, метода ёмкостного контакта и мультиканального анализа поверхностных волн для выявления скрытых мерзлотных структур вблизи объектов инфраструктуры проводилось инженерными службами Канады [Dawson, Mitchell, Henderson, 2016]. Георадиолокация и метод ёмкостного контакта применялись при выявлении подземных льдов [De Pascale, Pollard, Williams, 2008]. Сравнительный анализ геофизических методов выявления подземных льдов приведён в работе [Comparison of geophysical investigations..., 2006]. Информативность различных геоэлектрических методов при изучении объектов криолитозоны проанализирована с применением численного моделирования в работе [Improved Understanding of Permafrost Controls..., 2015]. Комплекс геоэлектрических методов использовался для мониторинга состояния активного слоя [Direct current (DC) resistivity and induced polarization..., 2015]. Аэро- и спутниковая съёмка в комплексе с электротомографией применялась для картирования деградирующих участков многолетнемёрзлых пород [Degrading permafrost mapped..., 2016]. Эффективность комплексирования дистанционного зондирования с наземной георадиолокационной съёмкой показана в работе [Quantifying and relating..., 2013]. Опыт совместного применения георадиолокации и электротомографии для исследования мёрзлых торфяников описан в работе [Geophysical mapping of palsa peatland..., 2015].

В справочной и нормативной литературе [Инструкция по магниторазведке..., 1981; Рекомендации по комплексированию..., 1987] имеются указания на возможность применения **магнитометрии** для выявления и картирования пластовых льдов, полигонально-жильных структур, а также других неоднородностей строения многолетнемёрзлых отложений. «Присутствие в



осадочных породах льда в виде жил, пластов или каких-либо других форм крупных размеров может послужить причиной отрицательных аномалий  $\Delta Z$ ,  $\Delta T$  или  $\Delta N$ » [Рекомендации по комплексированию..., 1987]. Проводились прецизионные измерения аномалий магнитного и гравитационного поля над полигонально-жильными льдами [Мельников, Гладкий, Лобанов, 1974].

Прецизионная магнитная съёмка характеризовалась в начале своего развития высокой трудоёмкостью наблюдений и, вероятно, по этой причине редко применялась при исследованиях на значительных площадях. Современная магнитометрическая аппаратура позволяет производить прецизионную съёмку с высокой скоростью. Примером тому может послужить её широкое применение в археологии [Becker, Fassbinder, 2001; Kvamme, 2006], где она является одним из самых эффективных методов картирования слабых (несколько нТл) аномалий, вызванных нарушениями в осадочных отложениях на глубине первых метров. Необходимо также отметить наличие богатого мирового опыта в смежной области: известно применение магнитометрии для картирования почв в целях решения агропромышленных задач [Allred et al., 2008]; среди трудов российских исследователей необходимо отметить диссертационную работу Косныревой М. В. [2007], в которой обсуждается возможность не только картирования особенностей строения почвенного слоя, но и мониторинга процессов деградации гумусовых горизонтов методом прецизионной магнитной съёмки. Немалое внимание в литературе уделено возможности картирования и диагностики типов почв по их магнитным свойствам [Вадюнина, Бабанин, 1972; Вадюнина, Смирнов, 1978; Зонн, 1982; Periglacial sediment variations..., 2008]. Аномалии в магнитном поле, связанные с мерзлотными структурами, отмечались исследователями в процессе археомагнитных исследований в криолитозоне [Hodgetts, Dawson, Eastaugh, 2011; Wolff, Urban, 2013; Combined Geophysical Approach..., 2015]. Реликтовые криогенные полигональные структуры обнаружены при исследовании участков Бородинского поля методами срединного градиента и магнитометрии [Картирование реликтовых криогенных..., 2011]. Известны примеры применения магнитной съёмки для обнаружения пластовых льдов [Матушкин, 1982; Отчёт по

теме 110К-89..., 1991]. Отрицательные магнитные аномалии в окрестности "Ямальской воронки" исследователи объясняют возможным наличием ледяной линзы, предположительно связанной с происхождением воронки [Результаты геофизических исследований..., 2016].

Существует ряд публикаций об исследовании магнитных свойств многолетнемерзлых пород. Возможность восстановления истории осадконакопления в криолитозоне на основе таких измерений показана в [Løvlie, Putkonen, 1996; Wang, Evans, 1997; Magnetic susceptibility application..., 2015], в том числе в исследуемом районе - дельте р. Лена [Periglacial sediment variations..., 2008; Palaeoenvironmental dynamics..., 2008]. Изменения минерального состава в криопроцессах находят отражение в аномалиях магнитной восприимчивости [Бабанин, Худяков, 1972; Mineral transformations..., 2003].

Таким образом, в научной литературе обозначен интерес к теме исследования полигонально-жильных льдов методами геофизики. Предпринимаются усилия по определению строения подземных льдов с применением современных модификаций методов электроразведки на постоянном токе, электромагнитного зондирования, гравиметрии, сейсморазведки, дистанционного зондирования. С другой стороны, методика прецизионной магнитной съёмки разработана и находит применение в таких областях как археология и почвоведение. Несмотря на это, существуют лишь единичные публикации о возможности применения магнитометрии в исследовании полигонально-жильных льдов, систематических исследований в этой области не проводилось.

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

Объёмная магнитная восприимчивость осадочных пород зависит, в первую очередь, от концентрации в ней ферромагнитных минералов. Увеличение объёмной доли льда, как немагнитной фракции, приводит к пропорциональному уменьшению магнитной восприимчивости и, как следствие, уменьшению амплитуды аномального магнитного поля над участком с повышенной льдистостью. Присутствие льда в виде жил, соответственно, может послужить причиной возникновения локальных отрицательных магнитных аномалий. В данной главе рассматриваются численные модели магнитных аномалий над полигонально-жильными льдами.

Наглядная схема формирования полигонально-озёрного рельефа, представленная на рисунке 1, даёт общее представление о пространственной конфигурации полигонально-жильных льдов.

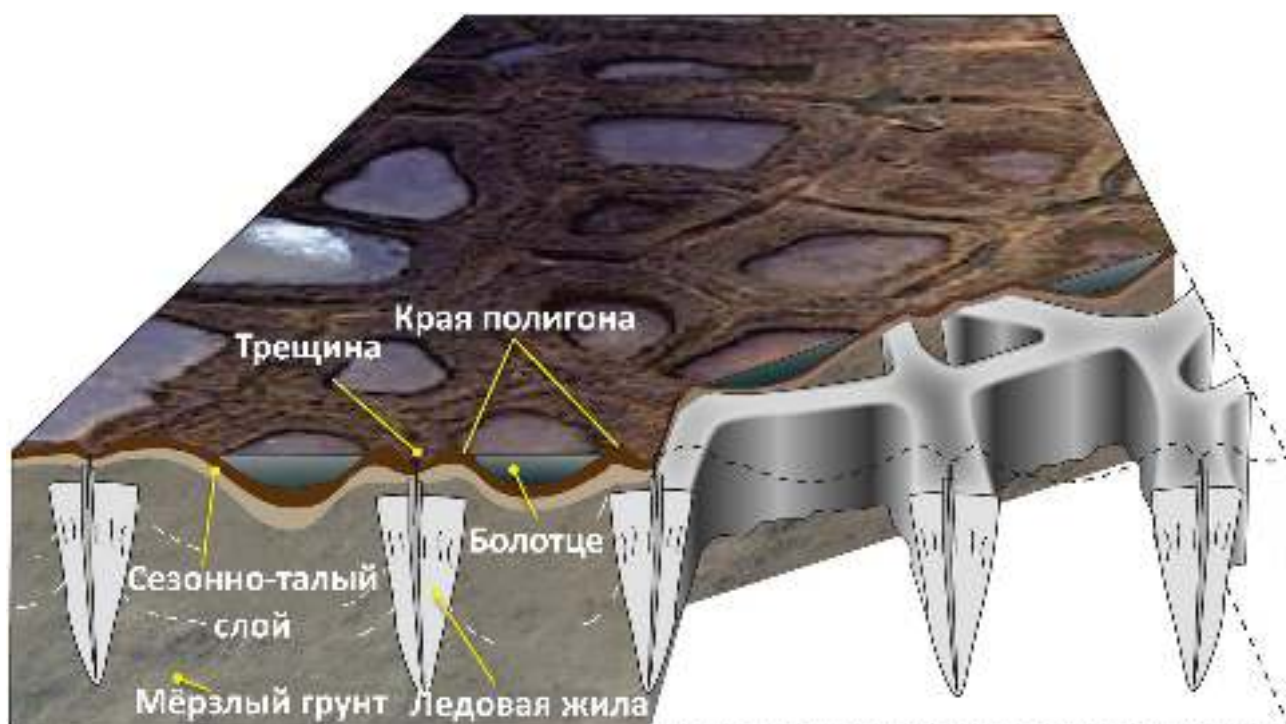


Рисунок 1 – Схема формирования полигонально-озёрного рельефа [Wildlife response..., 2009]

Численная модель многолетнемёрзлых отложений, содержащих повторно-жильные льды, соответствует этой схеме в упрощённом виде и представляет из себя участок полупространства с однородной положительной магнитной восприимчивостью (мёрзлые грунты), разделённые прямоугольной решёткой с нулевой магнитной восприимчивостью (система ледяных жил). Такая геометрия отвечает одному из простейших распределений льда, наблюдаемому в природе в полярных районах [Дубиков, 1966; Романовский, 1977; Washburn, 1979; Томирдиаро, 1980; Ершов, 2002; Васильчук, 2013; Pan-Arctic ice-wedge degradation..., 2016] и образующему хорошо известный полигональный рельеф, изображённый на рисунке 2.



Рисунок 2 – Полигонально-озёрный рельеф в дельте р. Лена (фото автора)

В обнажениях можно наблюдать весьма протяжённые по вертикали ледяные жилы, практически сохраняющие ширину на протяжении нескольких метров в верхней части разреза. Одно из таких обнажений представлено на рисунке 3.



Рисунок 3 – Ледяные жилы в отложениях о. Б. Ляховский [Кузнецова, 1965]

Наблюдаемая структура полигонально-жильных льдов легла в основу построения их численных моделей [Цибизов, 2017] в данной работе.

## 2.1 Методика расчётов

Численное моделирование было выполнено 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]. Благодаря относительно низким значениям магнитной восприимчивости, а также пренебрегая остаточной намагниченностью материала и допуская однородное намагничение тел во внешнем поле, намагниченность можно записать в виде:

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu_0} k \cdot \vec{B}, \quad (1)$$

где  $k$  — магнитная восприимчивость,  $B$  — магнитная индукция намагничивающего поля,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup>). Значение  $k$  для льда составляет около  $-10^{-5}$  СИ [Lonsdale, 1949] и в модели было принято равным 0.  $k$  мёрзлых грунтов может варьироваться в довольно широких пределах в зависимости от концентрации в них ферромагнетиков. Типичные

значения составляют  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  СИ [Бабанин, Худяков, 1972]. В настоящей работе расчёты были выполнены для мёрзлых пород с магнитной восприимчивостью  $10^{-3}$  СИ. Вследствие линейной зависимости аномалии модуля вектора магнитной индукции от  $J$  источника полученные аномалии можно легко пересчитать для других значений  $k$ . Намагничивающее поле задано в модели вертикальным, поскольку криолитозона наиболее распространена в полярных районах, где вектор геомагнитного поля имеет наклонение  $80^\circ$  и более. Модуль вектора магнитной индукции намагничивающего поля в модели принят равным 60 000 нТл, что близко к типичным его значениям для полярных районов. Вектор магнитной индукции намагничивающего поля задан постоянным на всех внешних границах расчётной области. Размер расчётной области выбран так, чтобы влияние границы на расчёт аномального поля вблизи объекта было пренебрежимо мало. Предварительные численные тесты показали, что при магнитной восприимчивости материала тестового объекта  $10^{-3}$  СИ отношение 5:1 размера области ( $L$ ) к размеру объекта ( $s$ ) удовлетворяет этому условию: разница аномалий модуля вектора магнитной индукции для значений  $L/s = 5:1$  и  $L/s \geq 7:1$  составляет менее 0.2 нТл на расстоянии 1 м над объектом. Результаты численных тестов представлены на рисунке 4. В качестве нулевого уровня выбрано поле над средой в отсутствие ледяных жил. Общий вид модели представлен на рисунке 5.

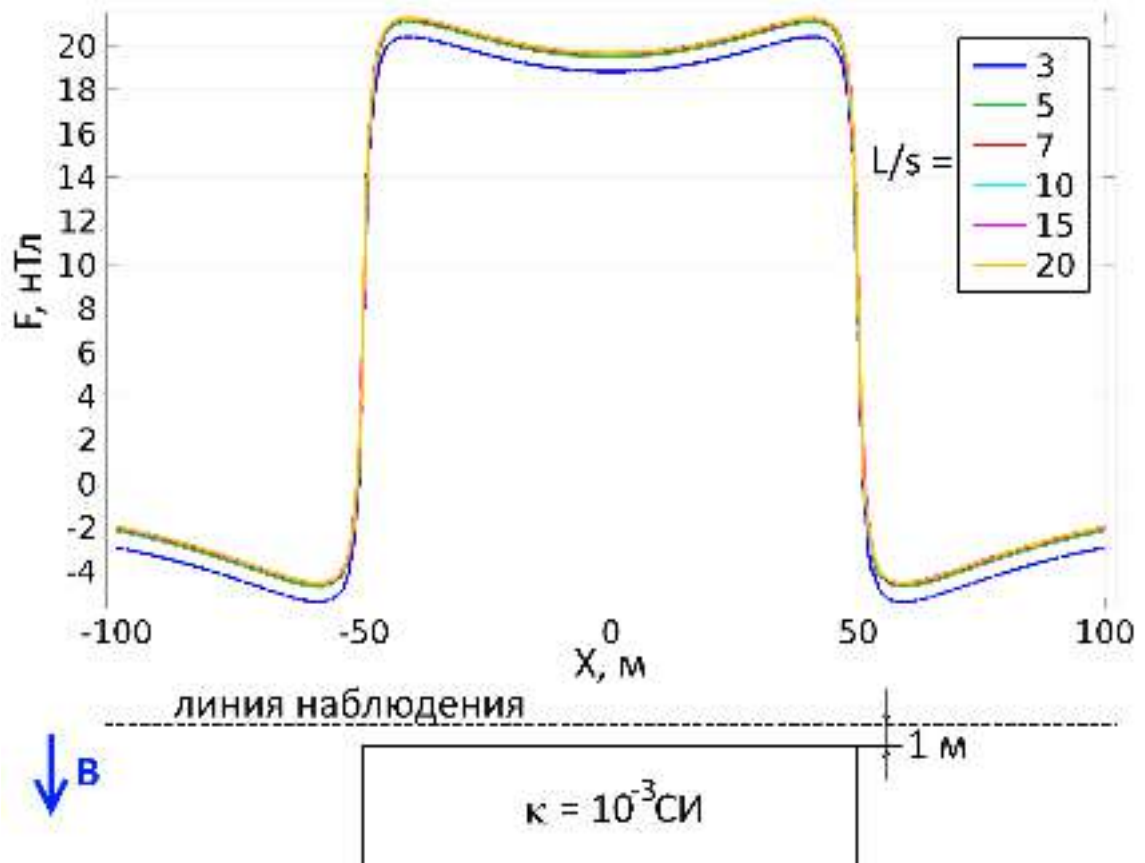


Рисунок 4 – Аномалии модуля вектора магнитной индукции для различных значений  $L/s$  – отношения размера расчётной области к размеру объекта

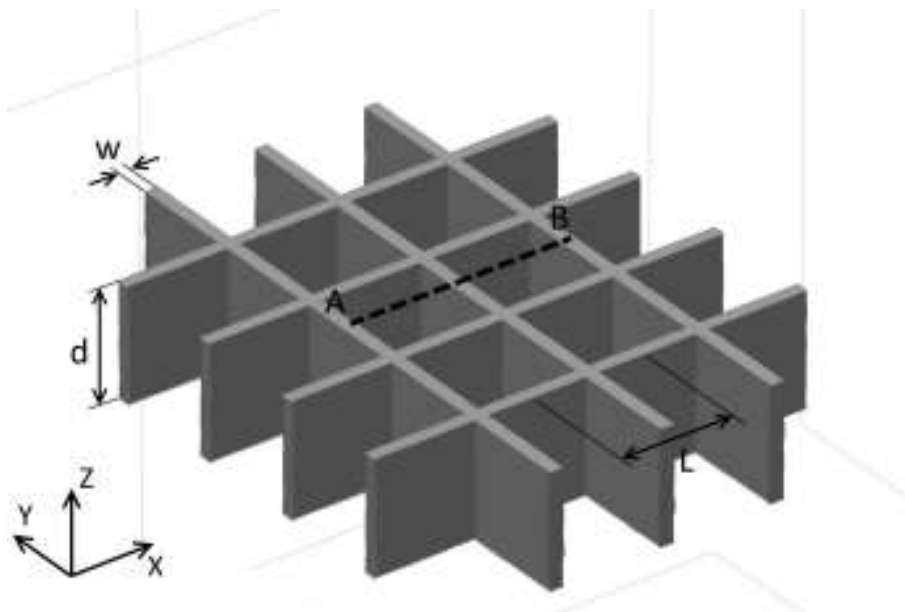


Рисунок 5 – Общий вид модели полигонально-жильной структуры: серым цветом обозначены ледяные жилы, прозрачное заполнение между ними — мёрзлый грунт;  $w$  — ширина жил,  $d$  — вертикальная протяжённость жил,  $L$  — расстояние между центрами полигонов;  $AB$  — линия профиля, на которой приводятся результаты расчёта

Рассмотрено влияние трёхмерного строения таких структур: аномальное магнитное поле над системой перпендикулярных жил и над одиночной жилой при ширине жил 5 м и расстоянии между полигонами 10 м отличается менее чем на 5% (Рисунок 6). При увеличении отношения ширины жил к размеру полигонов различие возрастает.

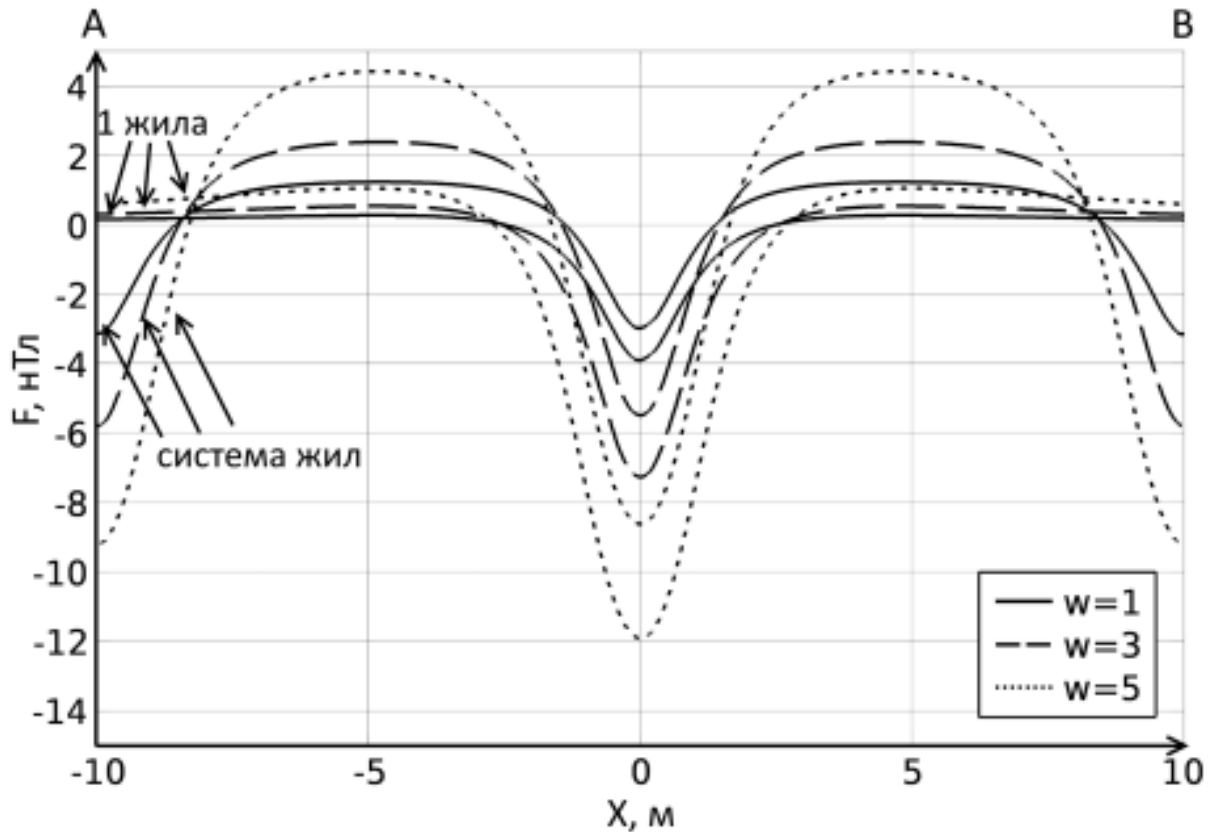


Рисунок 6 – Сравнение синтетических аномалий модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) над одиночной жилой и над объёмной полигонально-жильной структурой по профилю АВ (Рисунок 5) при различной ширине жил —  $w$ , вертикальной протяжённости жил —  $d = 5$  м, расстоянии между центрами полигонов —  $L = 10$  м, магнитной восприимчивости мёрзлого грунта —  $\kappa = 10^{-3}$  СИ

Слой осадков, перекрывающий ледяные жилы, рассматривается как слой постоянной мощности с однородной магнитной восприимчивостью. Это позволяет произвести вычитание этого слоя из модели, что не сказывается на величине аномального поля. Таким образом, расчёт аномалий  $F$  был выполнен на высотах от 1 до 5 м над верхней границей ледяных жил. Считая, что высота магнитной съёмки



составляет 1 м над поверхностью, это соответствует мощности перекрывающего слоя от 0 до 4 м. Как показано на рисунке 7, подобные мощности наблюдаются в зонах деградации многолетнемёрзлых пород [Patterns and rates of riverbank..., 2016] в том числе вблизи объектов инфраструктуры [Andersland, Ladanyi, 2004: Станиловская, Мерзляков, 2013].



Рисунок 7 – Надземный трубопровод в Якутии, проложенный по территории с реликтовыми мощными повторно-жильными льдами (фото А.Н. Федорова, Институт мерзлотоведения)  
[Станиловская, Мерзляков, 2013]

На рисунке 8 приведена фотография аналогичного строения толщ, содержащих полигонально-жильные льды, в дельте р. Лена.



Рисунок 8 – Ледяная жила в толще торфяников, перекрытой аллювиальными отложениями (дельта р. Лена, фото автора, зачистка А. А. Картозия)

## 2.2 Результаты численного моделирования

По литературным данным наиболее часто встречаются полигоны от 6-8 м до 15-20 м в диаметре, мощность ледяных жил при этом может составлять 0,2-0,4 от их вертикальной протяжённости [Дубиков, 1966; Washburn, 1979; Васильчук, 2013]. Вертикальная протяжённость, в свою очередь, составляет 0,3-1 от расстояния между центрами полигонов. На основании этого было рассмотрено две модели системы ледяных жил:

- 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 и ширина 3 м.

Отдельно было рассмотрено влияние формы верхней границы жил на параметры магнитных аномалий. Различие верхних оконечностей наблюдается в природе и зависит от условий формирования жил [Washburn, 1979]. Как видно из рисунка 9, различие формы верхней границы незначительно влияет на ширину аномалий, при этом сказывается на их амплитуде (до 30 % разницы при сравнении случаев сужающихся и расширяющихся жил).

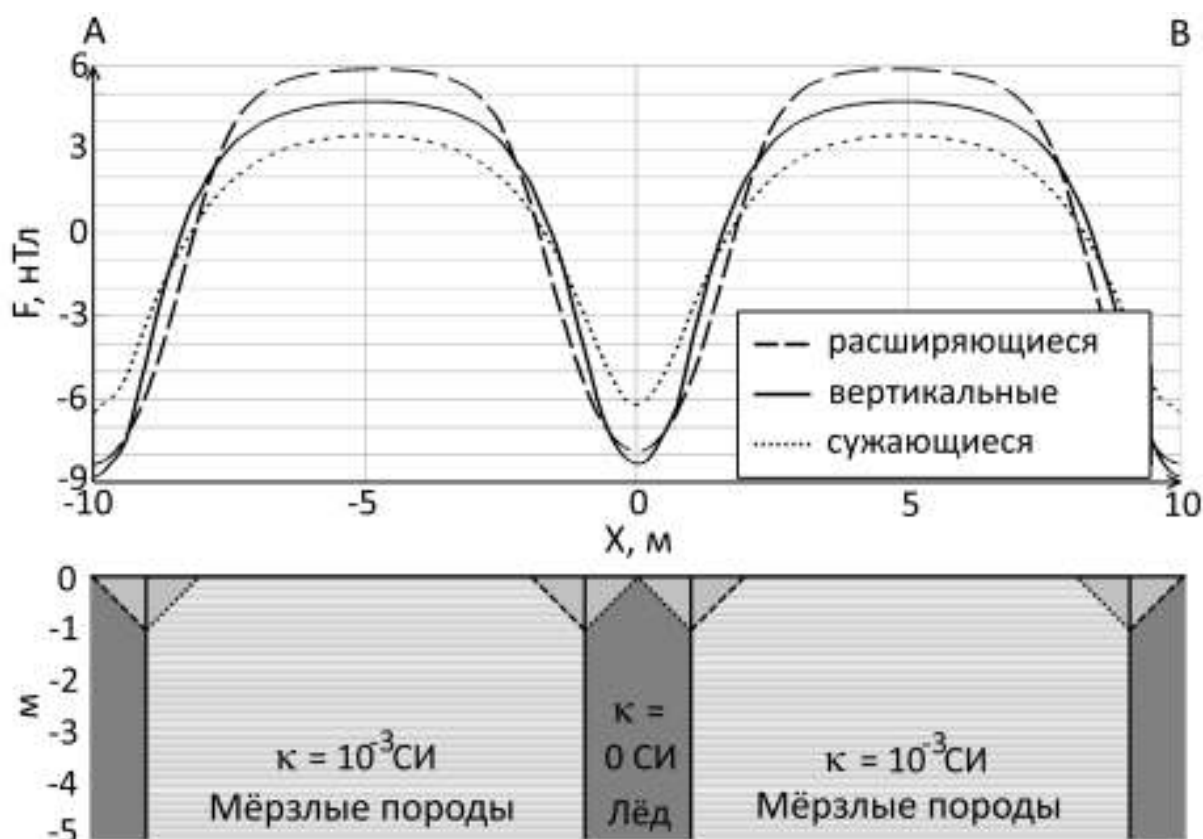


Рисунок 9 – Синтетические аномалии модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) над полигонально-жильной структурой по профилю АВ (Рисунок 5) при различной форме жил в верхней части; ширина жил –  $w = 2$ , вертикальная протяжённость жил —  $d = 5$  м, расстояние между центрами полигонов —  $L = 10$  м, магнитная восприимчивость мёрзлого грунта —  $\kappa = 10^{-3}$  СИ

В расчётах моделей 1 и 2 форма верхних границ ледяных жил была принята вертикальной. Результаты расчётов аномалий модуля вектора магнитной индукции на разных высотах приведены на рисунках 10, 11.

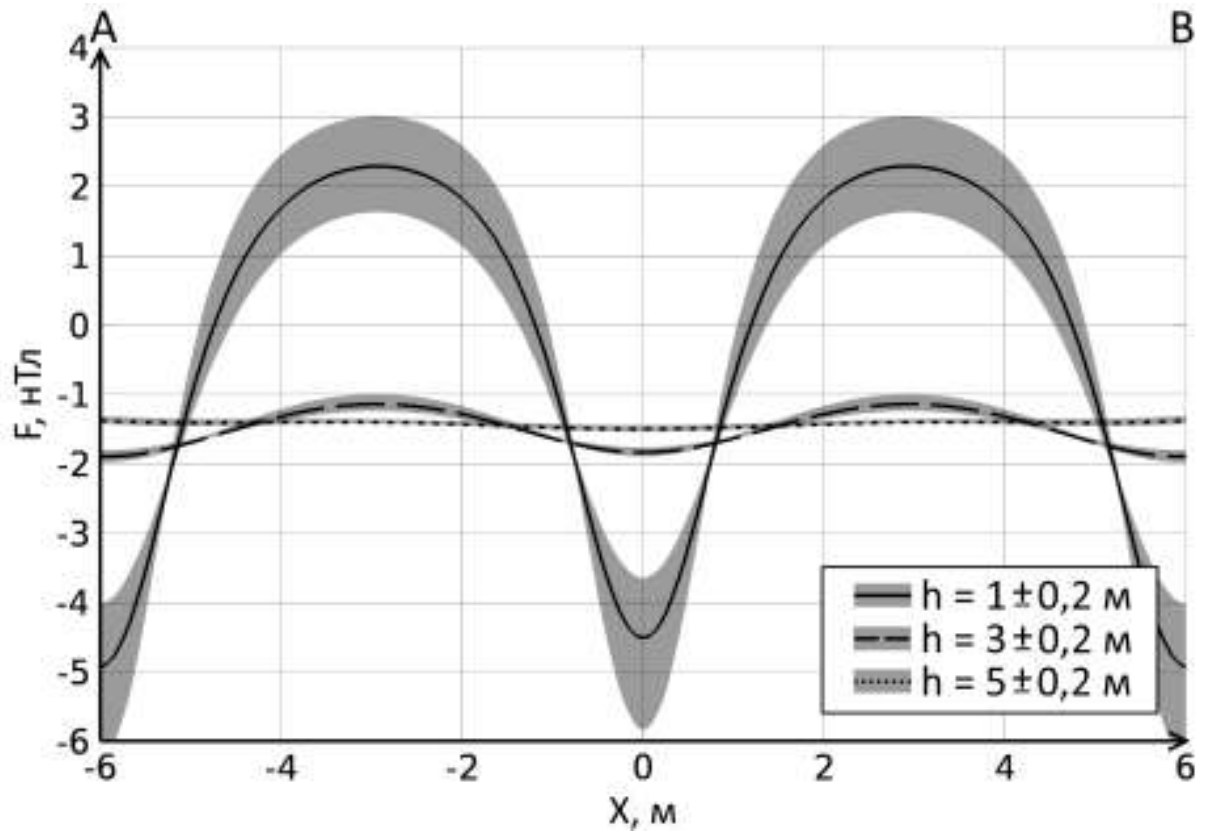


Рисунок 10 – Модель 1: синтетические аномалии модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) над полигонально-жильной структурой по профилю АВ (рисунок 5) на разных высотах; ширина жил –  $w = 1$  м, вертикальная протяжённость жил —  $d = 3$  м, расстояние между центрами полигонов —  $L = 6$  м, магнитная восприимчивость мёрзлого грунта —  $\kappa = 10^{-3}$  СИ; полупрозрачной областью отмечены зоны разброса значений  $F$  при отклонении высоты на  $\pm 0,2$  м

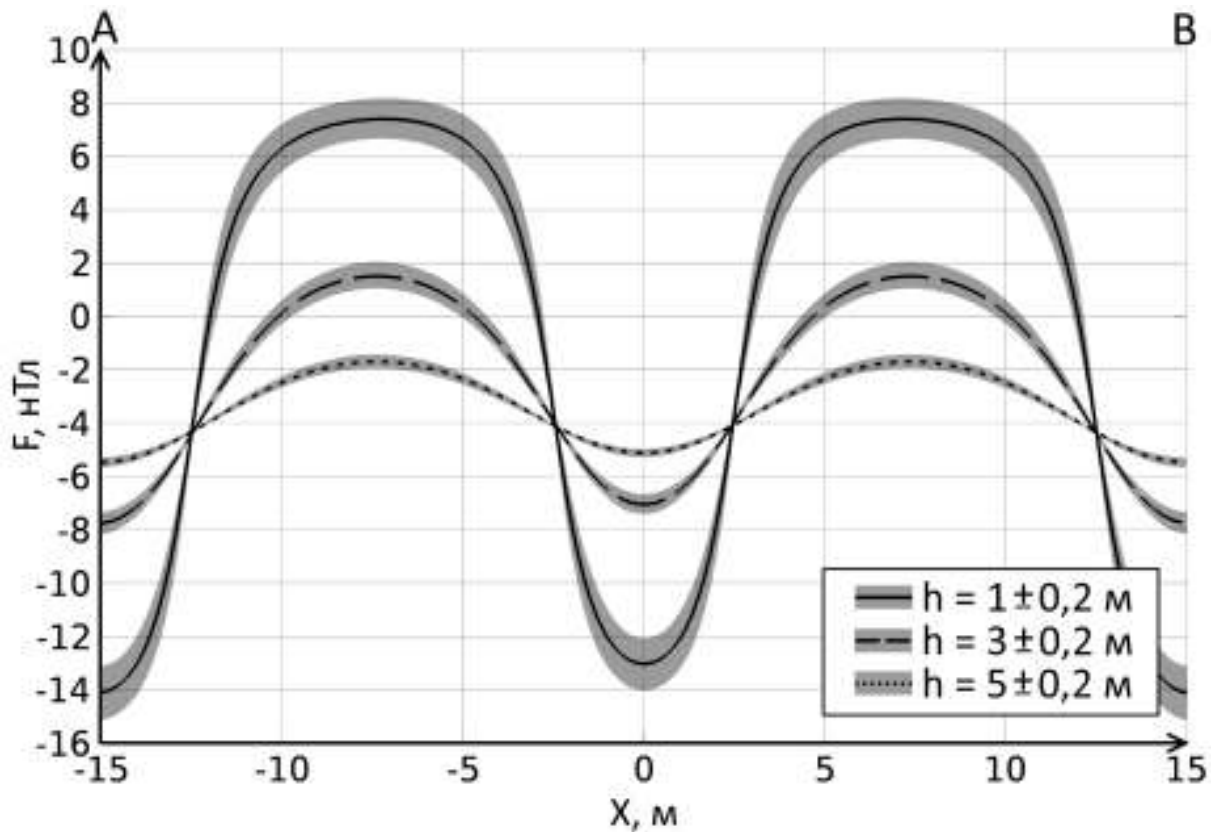


Рисунок 11 – Модель 2: синтетические аномалии модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) над полигонально-жильной структурой по профилю АВ (рисунок 5) на разных высотах; ширина жил –  $w = 3$  м, вертикальная протяжённость жил —  $d = 10$  м, расстояние между центрами полигонов —  $L = 15$  м, магнитная восприимчивость мёрзлого грунта —  $\kappa = 10^{-3}$  СИ; полупрозрачной областью отмечены зоны разброса значений  $F$  при отклонении высоты на  $\pm 0,2$  м

На рисунке 12 приведён результат расчёта аномального магнитного поля на участке площади над моделью полигонально-жильных льдов с параметрами, промежуточными для моделей 1 и 2: шириной жил 2 м, вертикальной протяжённостью 5 м и расстоянием между центрами полигонов 10 м при магнитной восприимчивости мёрзлого грунта  $10^{-3}$  СИ и мощности перекрывающей толщи 2 м.

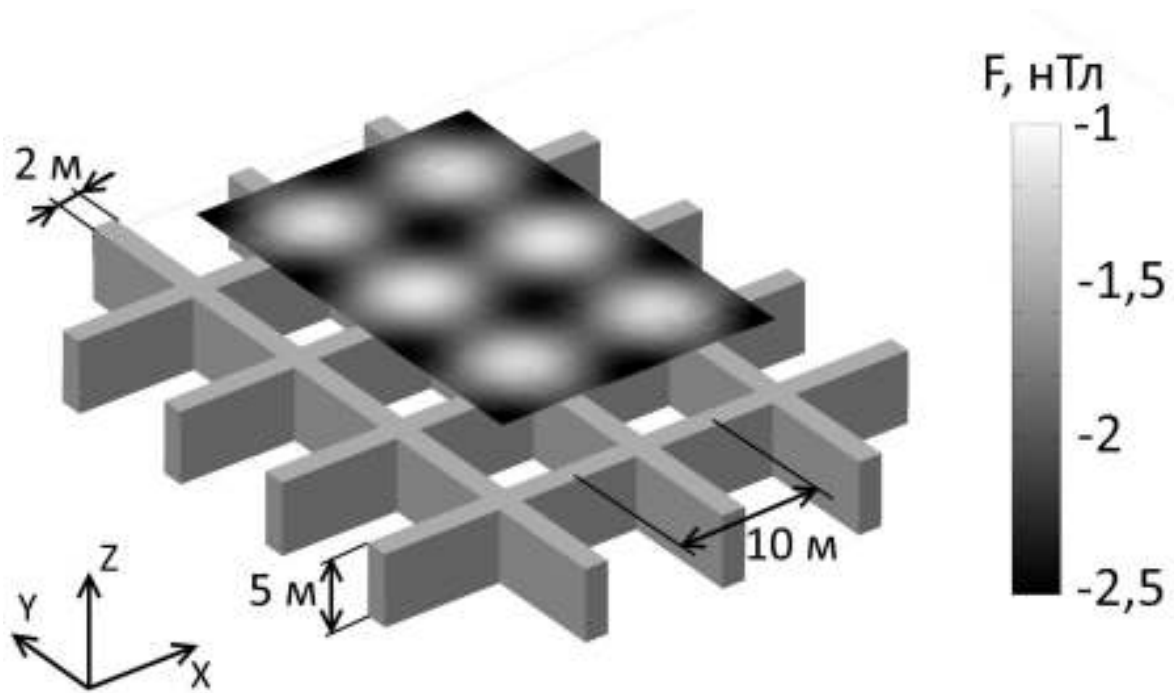


Рисунок 12 – Синтетическая модель распределения аномального модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) над полигонально-жильной структурой на высоте 3 м; ширина жил —  $w = 2$  м, высота жил —  $d = 5$  м, расстояние между центрами полигонов —  $L = 10$  м, магнитная восприимчивость мёрзлого грунта —  $\kappa = 10^{-3}$  СИ

Подобная картина распределения магнитных аномалий может быть построена по площадной сети измерений модуля вектора магнитной индукции над повторно-жильными льдами. Как видно из рисунка 12, карта магнитных аномалий позволяет выявить структуру полигонально-жильных льдов, скрытых под толщей осадков.

### 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 (Рисунок 11)

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 превысят 2 нТл. Учёт трёхмерного строения полигонально-жильной структуры в рассмотренных случаях изменяет результаты численных оценок менее, чем на 5 % в сравнении с квазидвумерными моделями. 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**

С целью экспериментального обоснования применения метода прецизионной магнитометрии для поиска полигонально-жильных льдов были выполнены полевые исследования на участках многолетнемёрзлых отложений дельты р. Лены. Методом прецизионной магнитной съёмки были получены значения аномалий модуля вектора магнитной индукции над участками многолетнемёрзлых отложений с полигонально-жильными льдами. В ряде точек в пределах участков были отобраны образцы пород и определены их магнитная восприимчивость и объёмная влажность. Для подтверждения связи наблюдаемых аномалий со структурой многолетнемёрзлых отложений были выполнены численные расчёты магнитных аномалий над моделями среды, построенными на основе геологических данных с учётом результатов исследования магнитных свойств многолетнемёрзлых пород.

#### **3.1 Описание района исследований**

Дельта р. Лена активно исследуется более 20 лет благодаря интенсивной работе российских и немецких экспедиций в последние десятилетия, результаты работ которых опубликованы на онлайн-сервисе PANGAEA [PANGAEA...], а также в серии сборников отчётов о российско-германских исследованиях «Российско-Германская кооперация СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ. Отчёты полярных и морских исследований» («Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA. Reports on Polar and Marine Research»).

Общая площадь дельты составляет приблизительно 30 тыс. км<sup>2</sup>. 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]. На рисунке 13 представлена ландшафтная карта дельты р. Лены, построенная по данным российско-немецких исследований [Schneider, Grosse, Wagner, 2009; Большианов и др., 2013].

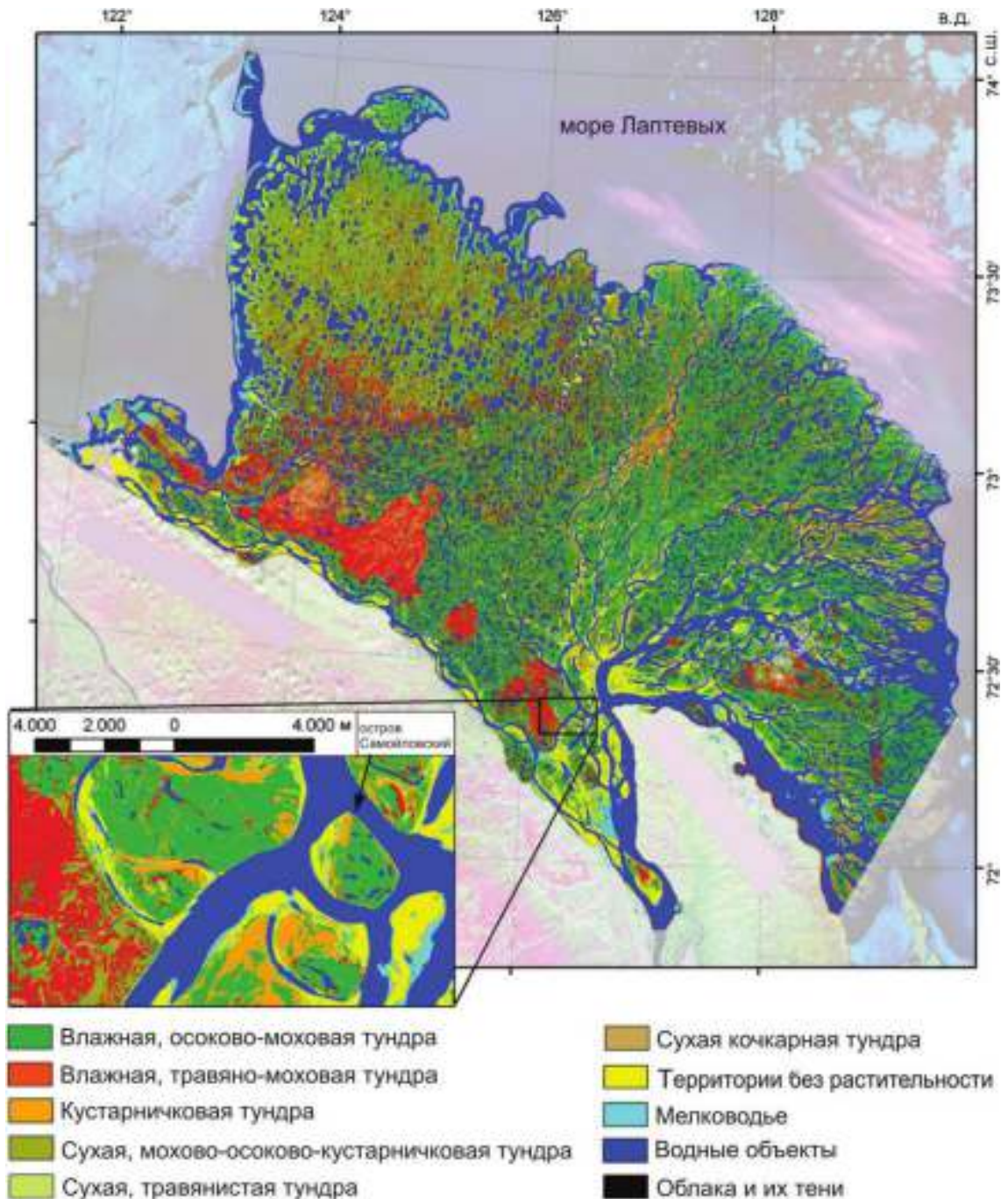


Рисунок 13 – Карта типов ландшафтов дельты р. Лена [Schneider, Grosse, Wagner, 2009; Большианов и др., 2013]

Полевые измерения, описанные в настоящей работе, проводились на базе научно-исследовательской станции "Остров Самойловский" Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, расположенной на о. Самойловский в верховьях дельты. Местоположение НИС благоприятствовало возможности исследовать отложения различного ландшафтного типа - о. Самойловский и о. Курунгнах (Рисунок 14).



Рисунок 14 – Участки исследований: 1 – участок полигональной тундры на о. Самойловский, 2, 3 – участки на ледовом комплексе и на склоне аласа на о. Курунгнах

Остров Самойловский ( $72,37584^{\circ}$  С. Ш.,  $126,48505^{\circ}$  В. Д.) в его западной части представлен толщей торфа, слагающего первую надпойменную террасу. Восточная часть острова представлена толщей аллювиальных образований высокой поймы. Генезис торфяных отложений на сегодняшний день является дискуссионным вопросом, одна из версий предлагает эстуарный тип [Большиянов и др., 2013]. Поверхность террасы представлена обводнённой полигональной тундрой. В толще торфяных отложений развита система полигонально-жильных льдов эпигенетического типа. Один из участков исследований был размещён на

острове в зоне полигональной тундры вблизи контакта торфяных отложений с аллювиальными. Этот участок выступал в роли тестового для опробования и верификации методики: ледяные жилы прослеживаются на поверхности в виде трещин и наблюдаются в обнажениях. При этом толща является относительно однородной, а система жил – довольно простой в сравнении с полигонально-жильными льдами о. Курунгнах [Kuzmina, Wetterich, Meyer, 2003].

Остров Курунгнах ( $72,39398^{\circ}$  С. Ш.,  $126,07893^{\circ}$  В. Д.) 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. Пространственное взаимоотношение жил этих двух систем не до конца ясно, в обнажении встречаются голоценовые жилы, как пронизывающие плейстоценовые жилы, так и попадающие в толщу едомы между ними [Palaeoenvironmental dynamics..., 2008]. 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.

Всего 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.

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 - 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.

## **3.2 Методика и аппаратура**

### ***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]. Участок съёмки размечался профилями при помощи измерительных лент, расстояние между профилями во всех случаях составляло 1 м. Вблизи участка устанавливалась магнитовариационная станция ММРОС-2 в режиме автоматической регистрации с периодом 5 сек. Время на станции устанавливалось вручную с точностью  $\pm 0.5$  секунды и сверялось с временем по GPS-навигатору в начале и в конце наблюдений. Градиент модуля вектора магнитной индукции в месте установки станций не превышал 2 нТл/м.

Пешеходный магнитометр GSMP-35g закреплялся на операторе при помощи немагнитного штатива, позволяющего расположить датчики на высоте около 1

метра над поверхностью и соблюдать при этом дистанцию более 1 м между датчиками и оператором во избежание помех, которые могут быть вызваны блоками управления, аккумулятором и прочими деталями магнитометра, закреплёнными на операторе. Перед началом измерений выполнялся контроль влияния аномального поля оператора с оборудованием на датчики: при уменьшении расстояния между оператором и датчиками из рабочего положения на 20 см изменение модуля вектора магнитной индукции не превышало 0.2 нТл.

Высота нижнего датчика над поверхностью мха составляла 0.4 м, верхнего - 1.15 м. Съёмка выполнялась вдоль профилей в автоматическом режиме с частотой 10 Гц. Расстояние между точками вдоль профиля при такой частоте составило приблизительно 8,5 см. Точность пространственной привязки при описанном способе съёмки оценивается как  $\pm 20$  см по трём координатам. Профили проходились в одном направлении, это позволило сохранять в течение съёмки приблизительно одинаковый угол между осью датчика и вектором геомагнитного поля и минимизировать ориентационную ошибку прибора (таблица 1). Кроме того, таким образом нивелировались возможные эффекты, связанные с постоянным аномальным магнитным полем оборудования, закреплённого на операторе, а также влияние рельефа (в силу конструкции штатива, при которой датчики вынесены вперёд по ходу оператора, при спуске со склона расстояние между датчиками и поверхностью было бы больше, чем при подъёме на склон). Временная привязка показаний пешеходного магнитометра осуществлялась при помощи встроенного GPS-приёмника.

Аппаратура:

1. Магнитометр-градиентометр GSMP-35g [GEM GSMP Potassium Magnetometer...] (Таблица 1).

2. Магнитометр MMPOS-1 [Магнитометр MMPOS-1...] (Таблица 2).

Таблица 1 – Технические характеристики магнитометра GSMP-35g

Диапазон измерений модуля магнитной индукции	от 15 000 до 120 000 нТл
Чувствительность	0.0012 нТл (10 Гц)
Разрешение	0.0001 нТл
Абсолютная точность	$\pm 0.05$ нТл
Градиентоустойчивость	50 000 нТл/м
Частота регистрации	1, 2, 5, 10, 20 Гц
Температурный диапазон	от $-40^{\circ}\text{C}$ до $+50^{\circ}\text{C}$
Ориентационная ошибка	$\pm 0.05$ нТл на $360^{\circ}$

Таблица 2 – Технические характеристики магнитометра MMPOS-1

Диапазон измерений модуля магнитной индукции	20 000 - 100 000 нТл
Основная систематическая погрешность измерения	0.5 нТл
Модуль среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения при длительности измерения не менее 3-х секунд	$< 0.02$ нТл
Дополнительная погрешность измерения в интервале температур от $-10^{\circ}\text{C}$ до $+50^{\circ}\text{C}$	$< 1$ нТл
Дополнительная погрешность измерения при отклонении первичного преобразователя на угол $45^{\circ}$ от оптимальной ориентации	$< 1$ нТл
Градиентоустойчивость	$< 20\,000$ нТл/м
Нестабильность за 8 часов работы	$< 0.3$ нТл
Длительность однократного измерения	$< 3$ с



Этапы обработки данных:

### 1. Первичная обработка.

На этом этапе отфильтровывались ошибки оператора и случайные выбросы. Координаты отсчётов распределялись равномерно на каждом профиле между точками привязки.

### 2. Учёт вариаций магнитного поля.

На втором этапе из показаний пешеходного магнитометра вычитались одновременные показания вариационной станции. Вследствие различной частоты регистрации (пешеходный магнитометр - 10 Гц, вариационная станция - 0.2 Гц) данные вариационной станции были линейно интерполированы. Необходимость учёта магнитных вариаций иллюстрирует рисунок 15 – магнитные вариации сопоставимы либо превышают амплитуду аномалий на профилях.

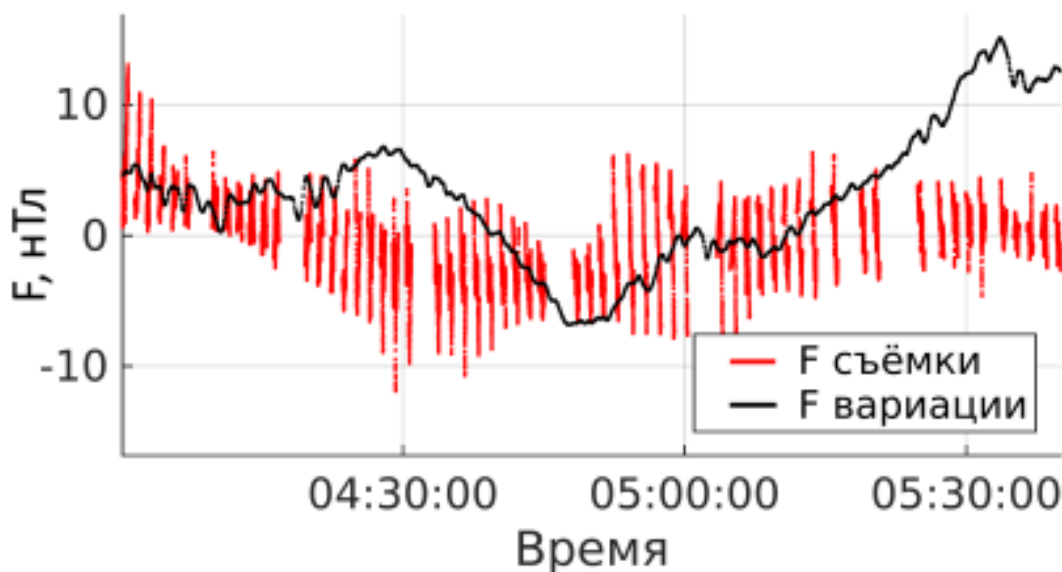


Рисунок 15 – Пример записи значений модуля вектора магнитной индукции на вариационной станции (чёрным) и на профилях (красным); из каждого ряда данных вычтено среднее значение

### 3. Приведение к условному уровню.

На третьем этапе показания обоих датчиков приводились к одному и тому же уровню, их разность (т.н. "вертикальный градиент") при этом не изменялась. В качестве условного уровня выбрано медианное значение показаний нижнего датчика после учёта вариаций согласно предыдущему пункту.

#### 4. Интерполяция на регулярной сетке.

На этом этапе для удобства обработки данные каждого профиля были линейно интерполированы через 10 см. Расстояние между профилями при этом осталось равным 1 м. Таким образом был получен массив данных на регулярной сетке с размером ячейки  $1 \times 0.1$  м.

5. Построение карт аномальных значений модуля вектора магнитной индукции для высоты 1.15 м (по данным верхнего датчика). Задавалась регулярная сетка для высоты 1.15 м с размером ячейки  $1 \times 1$  м. В узлах сетки вычислялись медианные значения с соответствующего профиля в интервале  $\pm 0.5$  м. По этим значениям методом кусочно-кубической интерполяции на сетке с размером ячейки  $0.1 \times 0.1$  м строились карты аномалий модуля вектора магнитной индукции.

#### 6. Наконец, оценивалась погрешность выполненных измерений.

Основные источники погрешности определения  $F$ :

- Аппаратурная погрешность измерения модуля вектора магнитной индукции.
- Ошибка временной интерполяции при учёте вариаций, включая ошибку временной привязки измерений магнитовариационной станции.
- Погрешность, связанная с неточностью пространственной привязки.

Суммарная аппаратурная погрешность MMPOS-1 и GSMP-35g не превышает 0.1 нТл (с учётом температурных и ориентационных ошибок).

Ошибка, связанная с учётом вариаций может быть оценена на основании следующих соображений. Максимальное изменение модуля вектора магнитной индукции в наиболее магнитоактивный день измерений (Рисунок 3 в приложении А) составило 2 нТл за 5 секунд, т.е. 0,4 нТл/сек. Среднее – 0,01 нТл/сек. Таким образом, неточность синхронизации 0,5 секунд приведёт к ошибке не более 0,2 нТл.

Для оценки погрешности съёмки выполнялись измерения на контрольных профилях. Средняя квадратическая погрешность  $\sigma$  результата на основании двойных равноточных измерений с одинаковым весом рассчитывалась согласно формуле [Инструкция по магниторазведке..., 1981]:



$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{2(n-1)}}, \quad (2)$$

где  $\Delta_i$  – разность между  $i$ -м результатом рядового и контрольного измерения,  $n$  – число точек. Для участка 3 (алас, о. Курунгнах), на котором наблюдаются наиболее интенсивные аномалии, получены следующие значения погрешности для двух высот съёмки:  $\sigma(F1) \approx 0.8$  нТл,  $\sigma(F2) \approx 0.2$  нТл. Пример результатов контрольных измерений приведён на рисунке 16.

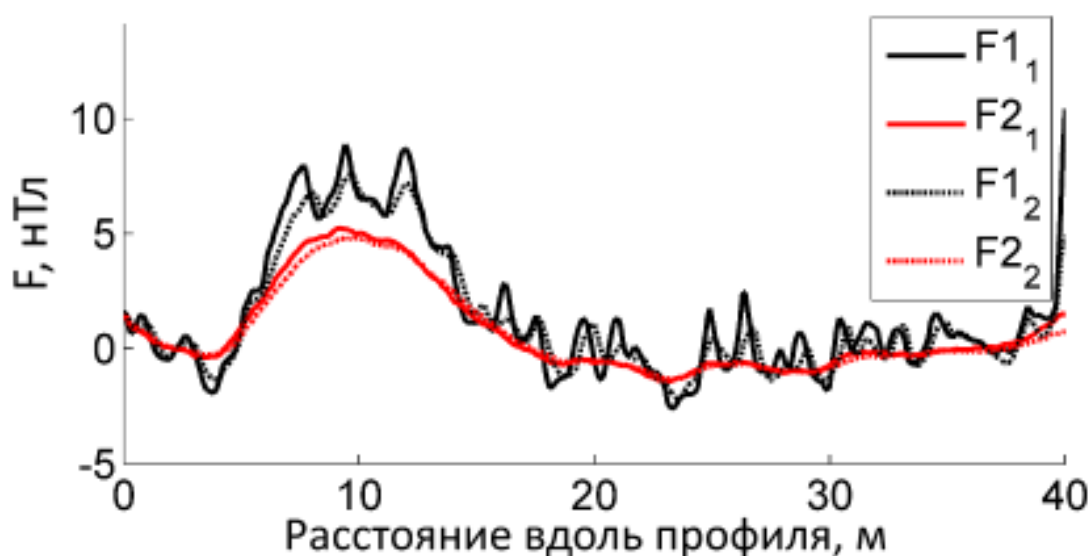


Рисунок 16 – Аномалии модуля вектора магнитной индукции на двух высотах рядового ( $F1_1$  и  $F2_1$ ) и повторного (контрольного) профиля ( $F1_2$  и  $F2_2$ )

Величина погрешности, связанной с неточностью пространственной привязки, прямо пропорциональна градиенту магнитного поля в точках измерения. Для оценки этой погрешности в точках с интервалом 1 м вдоль каждого профиля были вычислены медианные значения модуля вектора магнитной индукции в радиусе 0.5 м и рассчитано среднеквадратическое отклонение значений в этом радиусе от медианного. Таким образом было учтено возможное отклонение датчика от точки привязки при съёмке. Пример значений вдоль профиля с указанием погрешности приведён на рисунке 17.

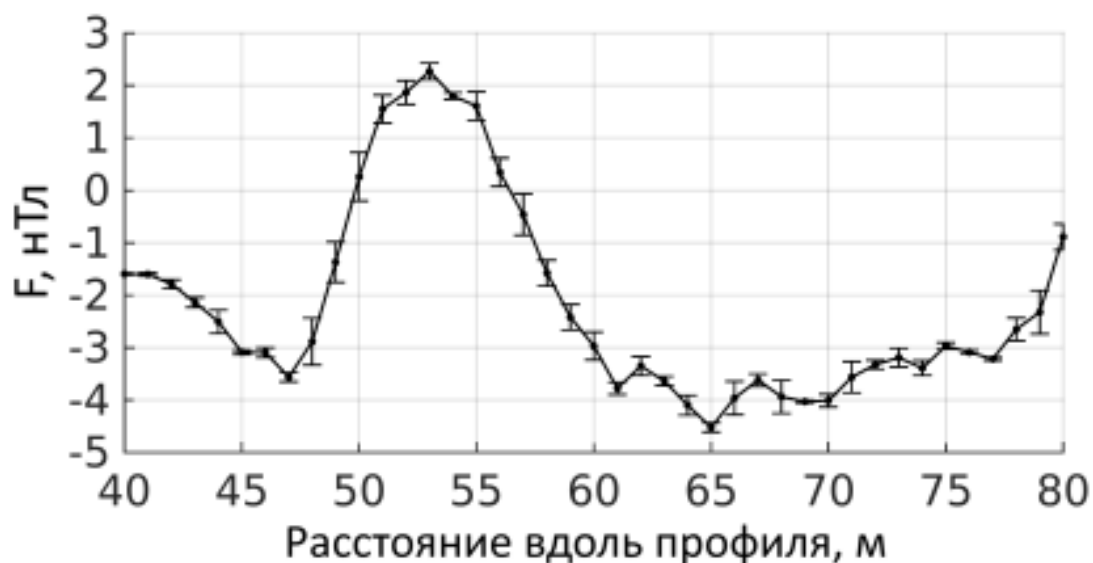


Рисунок 17 – Аномалии модуля вектора магнитной индукции в точках профиля на высоте 1.15 м над поверхностью и значения погрешности, обусловленной неточностью пространственной привязки

Таким образом было рассчитано распределение ошибок на каждом участке съёмки и рассчитано значение ошибки для 99% доверительного интервала. Для участка 1 (о. Самойловский) это значение составило 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***

Исследование образцов многолетнемёрзлых пород производилось с целью установления типичных значений их магнитной восприимчивости для интерпретации данных магнитной съёмки. Кроме того, необходимо было верифицировать наличие значимой обратной связи магнитной восприимчивости и объёмной влажности пород: при повышении содержания слабомагнитного материала (в данном случае льда) в породе, её объёмная магнитная восприимчивость уменьшается, и эта зависимость близка к линейной. Под объёмной влажностью понимается отношение объёма воды во всех состояниях, в том числе льда, к объёму мёрзлого грунта [Ершов, 2004, с. 31]. При этом помимо

содержания льда существенное значение могут оказывать другие факторы, например, вариации состава минерально-органической части грунта. Доказательство существенной роли влажности (на фоне прочих факторов) в значении магнитной восприимчивости среды даёт основание связывать отрицательные магнитные аномалии с зонами повышенной объёмной влажности, в данном случае - повышенным содержанием льда, т.е. ледяными жилами.

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...] (Таблица 3) сразу после их изъятия из пробоотборника. Измерение производилось не менее трёх раз на каждом образце, записывалось медианное значение. С учётом того, что размер образцов меньше измерительной области каппаметра (около 60 мм в поперечнике), потребовалось ввести дополнительный поправочный коэффициент 2, вычисленный при сравнении магнитной восприимчивости многолетнемёрзлой породы из одной и той же точки отбора, измеренной в стенке шурфа и в образце. Это значение соответствует поправочной кривой, приведённой в инструкции для прибора.

Таблица 3 – Технические характеристики КТ-5

Чувствительность	$10^{-5}$ СИ
Диапазоны измерений	0-9.99, 10-99.9, 100-999 $\cdot 10^{-3}$ СИ
Рабочая частота	10 кГц

На 144 образцах была измерена магнитная восприимчивость и оценена объёмная влажность этих образцов ( $W$ ) по формуле:

$$W = \frac{m_i}{\rho_i \cdot V_0}, \quad (3)$$

где  $m_i$  и  $\rho_i$  – масса и плотность воды (в твёрдом и жидком состоянии),

соответственно, а  $V_0$  – общий объём мёрзлого грунта. Масса воды  $m_i$  определялась как разность общей массы образца мёрзлого грунта и массы минерально-органического остатка после высушивания. Плотность  $\rho_i$  принималась равной  $0,91 \text{ г/см}^3$ . Около 20% образцов при отборе находились в размороженном состоянии (таблица 1, приложение Б). Для этих образцов, соответственно, значение плотности  $\rho_i$  принималось равным  $1 \text{ г/см}^3$ . Объём каждого образца рассчитывался как произведение площади сечения пробоотборника на приращение глубины отбора данного образца. Как показала практика, непосредственное измерение объёма образцов, извлечённых из пробоотборника, приводит к неверному результату вследствие неконтролируемой деформации и частичных разрушения и разуплотнения образцов при отборе. Глубина отбора отсчитывалась от поверхности растительного покрова. Погрешность привязки образцов по глубине составила 5 см, погрешность определения приращения глубины – 1 см. Поскольку большинство образцов отбиралось поэтапно по 10 см приращения глубины, погрешность определения объёма большинства образцов составила  $14 \text{ см}^3$ , что составляет 10% от их объёма. Взвешивание производилось на электронных весах с точностью 0,01 гр., масса образцов составляла более 100 гр., так что погрешность определения массы пренебрежимо мала. Таким образом, погрешность определения объёмной влажности можно оценить в 10%.

### ***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 измерений по критерию:

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |F_i^{\text{изм}} - F_i^{\text{мод}}|, \quad (4)$$

где  $F_i^{\text{изм}}$  – аномальное значение модуля вектора магнитной индукции, полученное в результате полевых измерений в  $i$ -й точке,  $F_i^{\text{мод}}$  – рассчитанное методом численного моделирования в той же точке,  $n$  – количество точек ряда разностей  $|F_i^{\text{изм}} - F_i^{\text{мод}}|$ , отсортированного по возрастанию. Значение  $n$  составляло 0,9 от  $N$  – общего количества точек. Это позволило при сравнении результатов моделирования с данными измерений не принимать во внимание отклонения, вызванные локальными аномалиями. Оптимальными считались варианты моделей, аномалии над которыми оказались наиболее близки к измеренным согласно критерию, приведённому выше (4).

### 3.3 Результаты полевых наблюдений и интерпретация

#### 3.3.1 Участок 1: о. Самойловский

Участок исследований размером  $20 \times 24$  м<sup>2</sup> на о. Самойловский включает фрагмент полигональной структуры, образованной повторно-жильными льдами. Участок расположен в зоне перехода от влажной моховой тундры, покрывающей отложения торфяников, к относительно сухим песчаным отложениям. Участок включает небольшое болотце и трещину, предположительно связанную с ледяной жилой, подобной встречающимся в обнажениях в восточной части острова (Рисунок 18).



Рисунок 18 – Ледяная жила в обнажении в восточной части о. Самойловский (фото и зачистка А. А. Картозия)

Общий вид участка приведён на рисунке 19.



Рисунок 19 – Общий вид площади съёмки - участок на о. Самойловский. Рулетка на снимке размотана вдоль центрального профиля ( $X = 0$  м) участка длиной 24 м

Аэрофотоснимок участка и схема наблюдений представлены на рисунке 20.

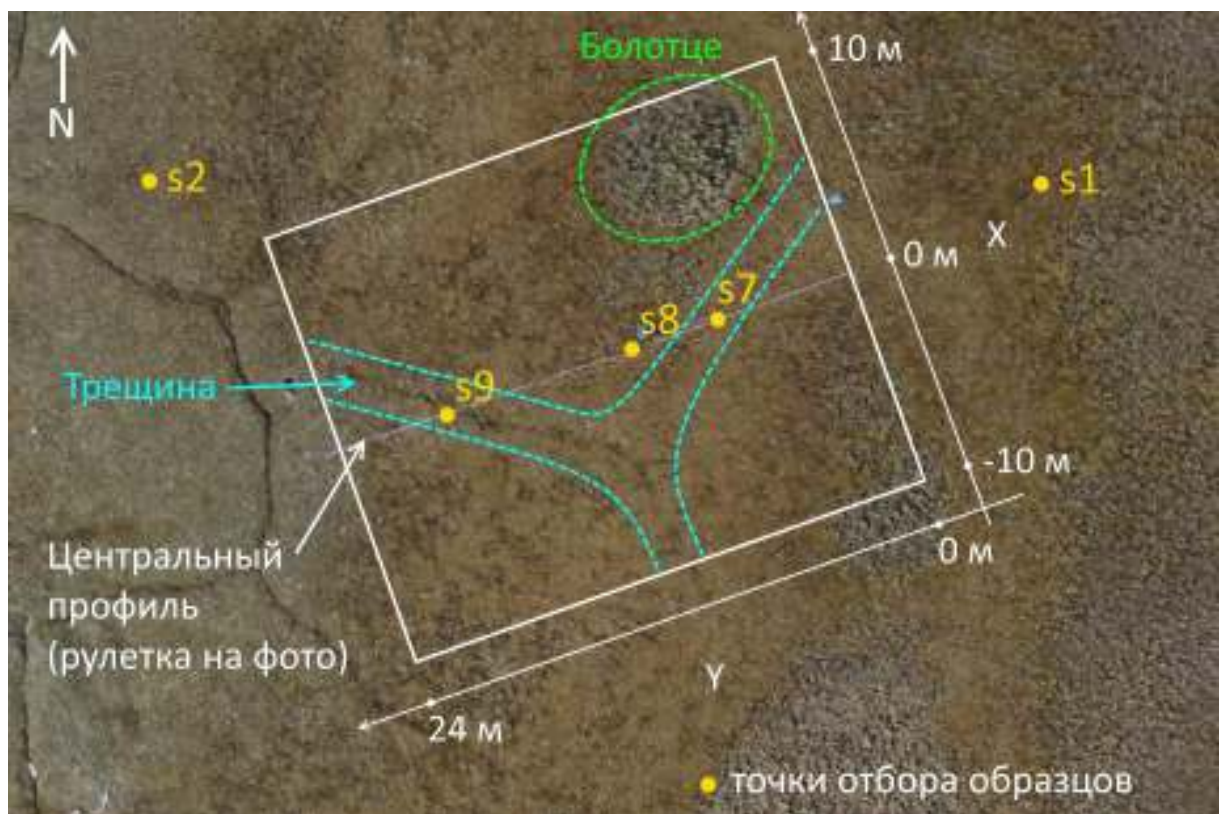


Рисунок 20 – Аэрофотоснимок участка 1 (о. Самойловский); белым прямоугольником отмечены границы участка магнитной съёмки



На участке была выполнена съёмка методами прецизионной магнитометрии, а также произведён отбор образцов. Результаты магнитной съёмки приведены на рисунке 21.

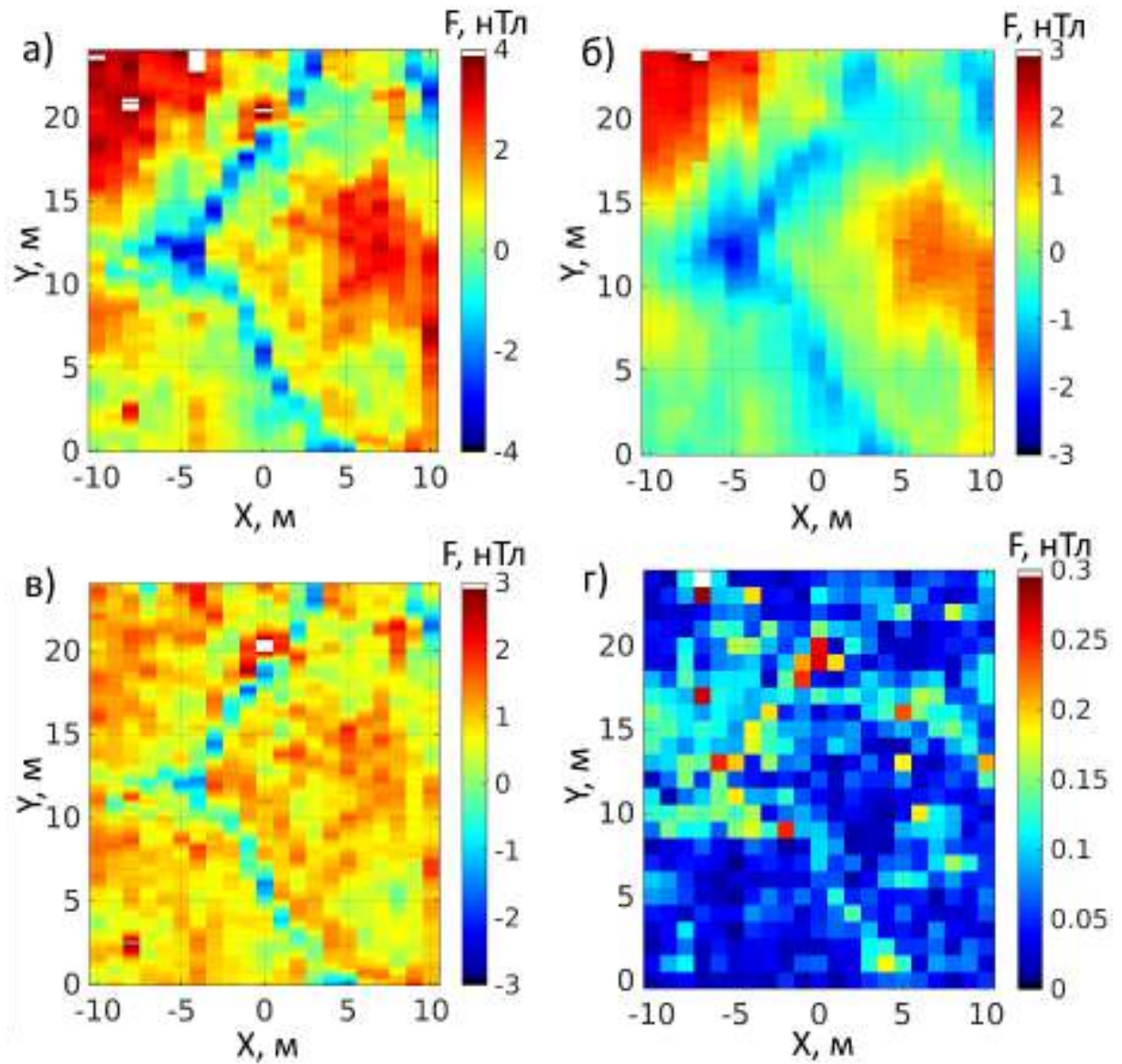


Рисунок 21 – Результаты магнитной съёмки на участке 1 (о. Самойловский): аномальные значения модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) на профилях съёмки для высоты 0.4 м (а) и 1.15 м (б), их разность, т. н. «вертикальный градиент», (в); распределение погрешности определения  $F$  в узлах сетки  $1 \times 1$  м на высоте 1.15 м над поверхностью мха (г)

Карта аномальных значений модуля вектора магнитной индукции на высоте 1.15 м, построенная по равномерной сетке согласно описанной методике, приведена на рисунке 22.



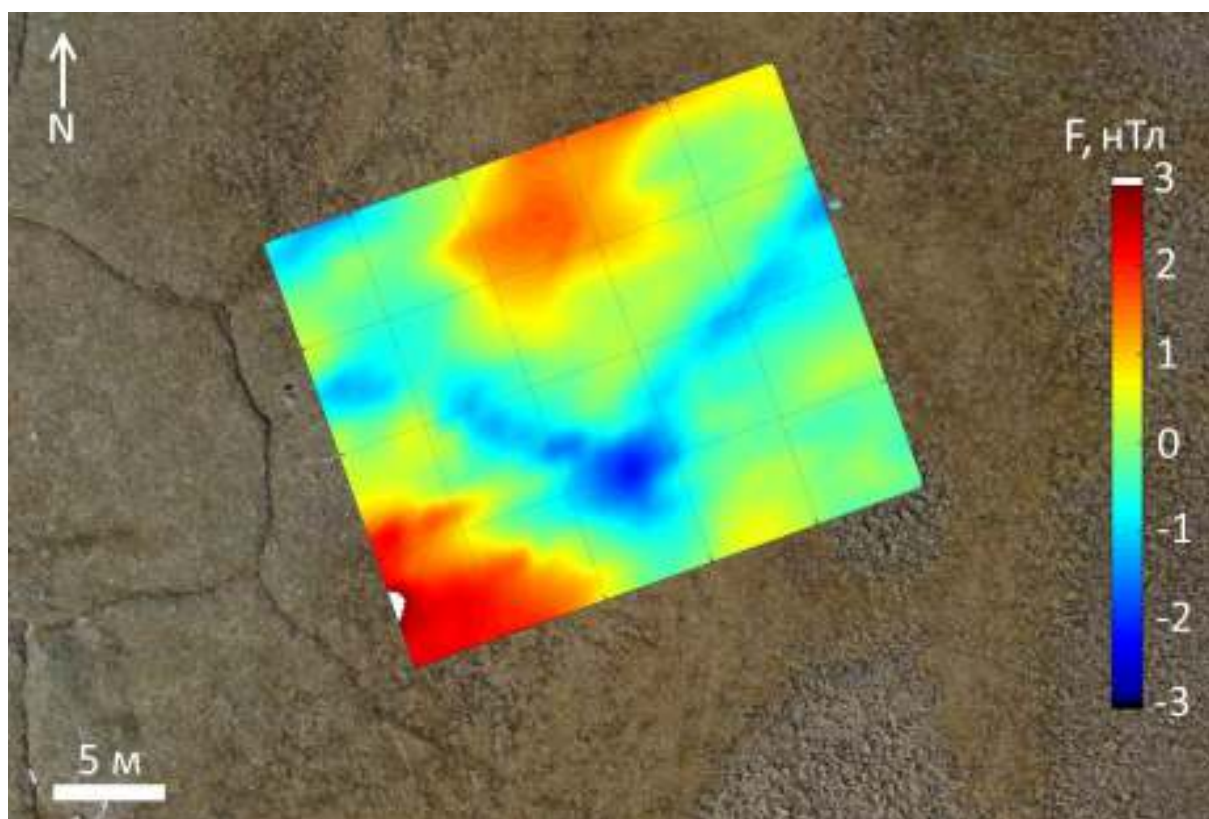


Рисунок 22 – Аномальные значения модуля вектора магнитной индукции на высоте 1.15 м над поверхностью

Как видно из рисунков 21 и 22, в аномальном магнитном поле отчётливо выделяется линейная зона отрицательных аномальных значений модуля вектора магнитной индукции. Эта зона соответствует в плане трещине, которая просматривается на аэрофотоснимке (Рисунок 20), и, вероятно, маркирует ледяную или ледогрунтовую жилу.

В зоне пересечения центральным профилем трещины (вблизи отметки 6 м вдоль профиля) вкост направлению трещины отложения были вскрыты шурфом (Рисунок 23).



Рисунок 23 – Положение шурфа, в котором производилось измерение магнитной восприимчивости многолетнемёрзлых пород; измерительная лента лежит на центральном профиле ( $X = 0$ ); трещина отмечена голубым пунктиром

На дне шурфа просматривается полоска льда, возможно, верхняя оконечность ледяной жилы (Рисунок 24).



Рисунок 24 – Верхняя часть ледяной жилы в шурфе на участке 1 (о. Самойловский); данные о магнитной восприимчивости многолетнемёрзлых пород, вскрытых шурфом, представлены на рисунке 25

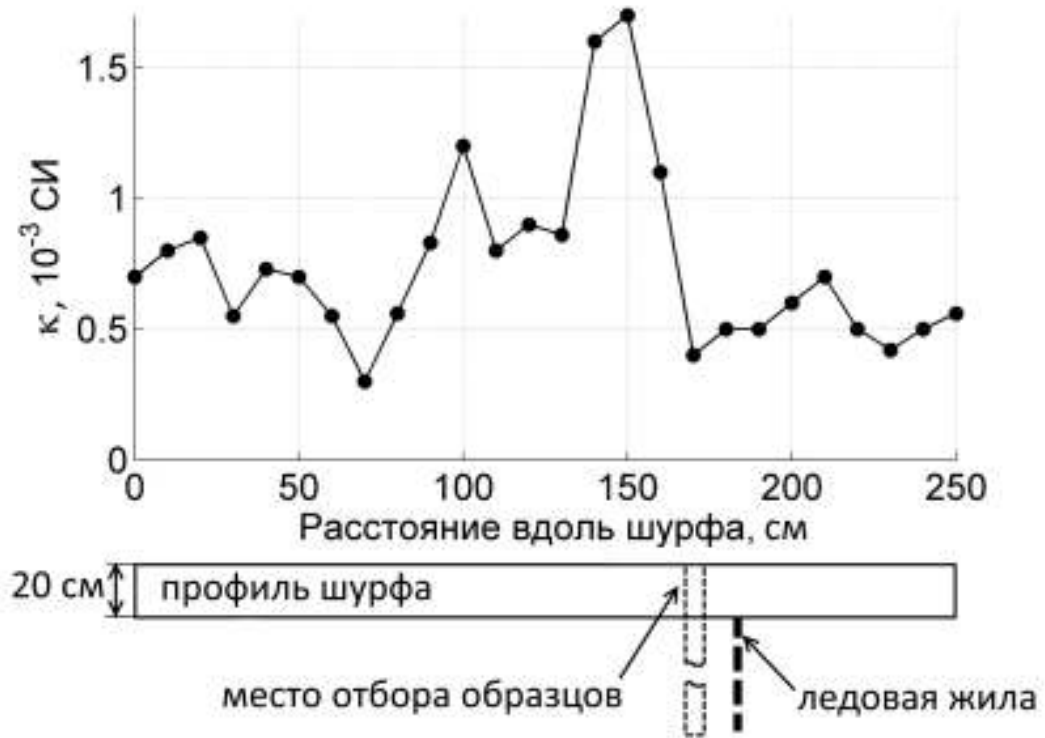


Рисунок 25 – Результаты измерения магнитной восприимчивости многолетнемёрзлых пород на дне шурфа

Результаты исследования образцов в точках отбора проб (Рисунок 20) представлены на рисунке 26.

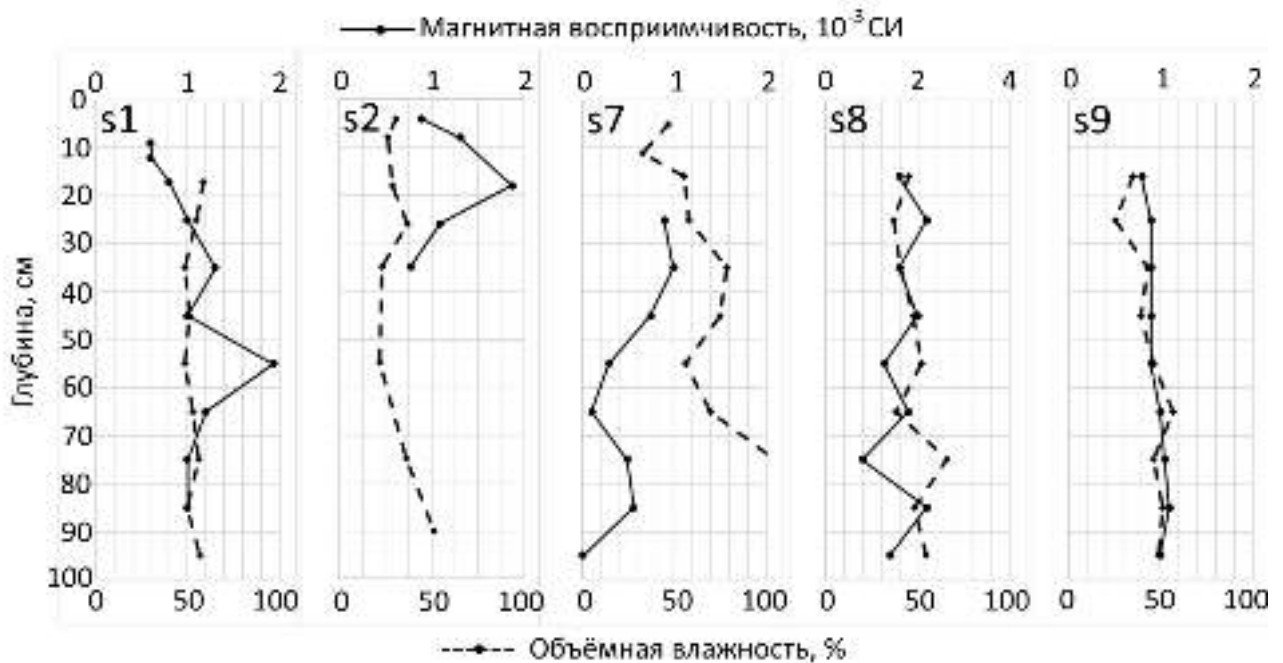


Рисунок 26 – Результаты исследования образцов многолетнемёрзлых пород на участке 1 (о. Самойловский)

Вследствие значительной неоднородности магнитной восприимчивости мёрзлого грунта возникает существенная неоднозначность решения обратной задачи для данного участка. Несмотря на это, аномалия, вызванная ледяной жилой, проявляется на фоне прочих весьма отчётливо. Это позволяет предложить простейшую модель ледяной жилы. Её геометрия представлена на рисунке 27.

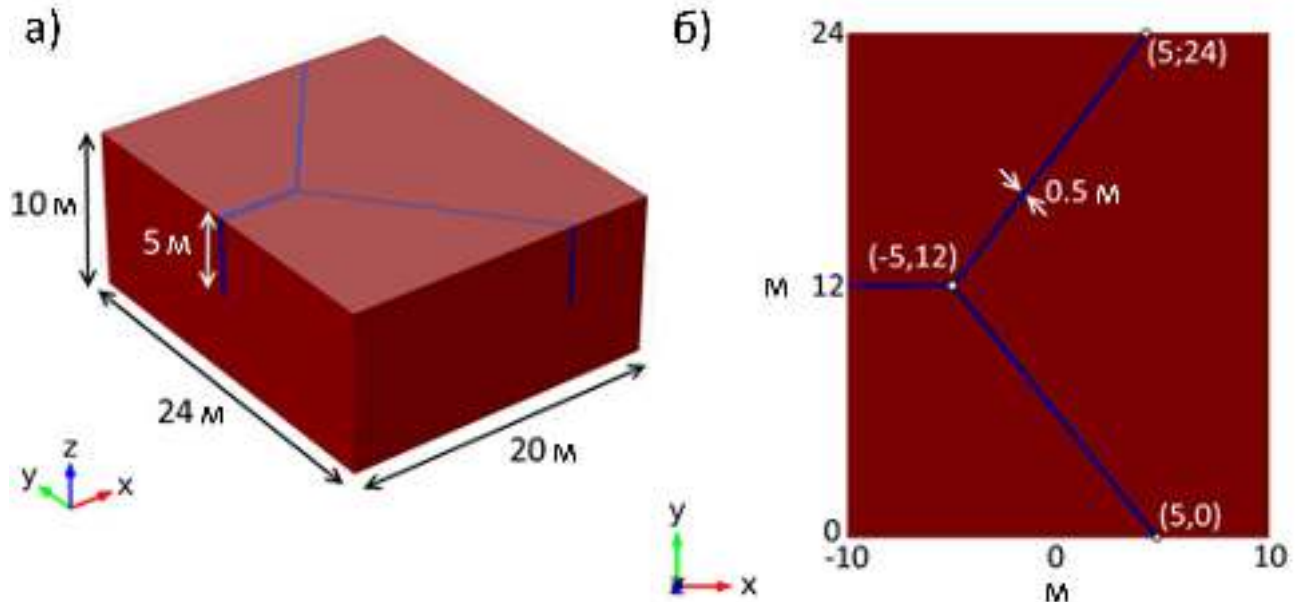


Рисунок 27 – Модель ледяной жилы в мёрзлом грунте на участке 1 (о. Самойловский): в перспективе (а) и в плане (б)

Магнитная восприимчивость мёрзлого грунта была принята равной  $0.5 \cdot 10^{-3}$  СИ, ледяной жилы - 0 СИ. В процессе подбора варьировались следующие параметры: ширина и высота ледяной жилы, магнитная восприимчивость мёрзлого грунта. Расчёт был выполнен для каждой комбинации параметров на двух высотах 0,4 и 1,15 м над поверхностью мха (для учёта мощности слоя мха, обладающего нулевой магнитной восприимчивостью, расчёт выполнялся на 10 см выше, т.е. на 0,5 и 1,25 м). При этом также рассчитывались значения аномалий на высотах  $\pm 20$  см от указанных выше для оценки возможных ошибок, возникающих из-за вертикальных колебаний датчика в процессе съёмки. Результат моделирования представлен на рисунке 28.



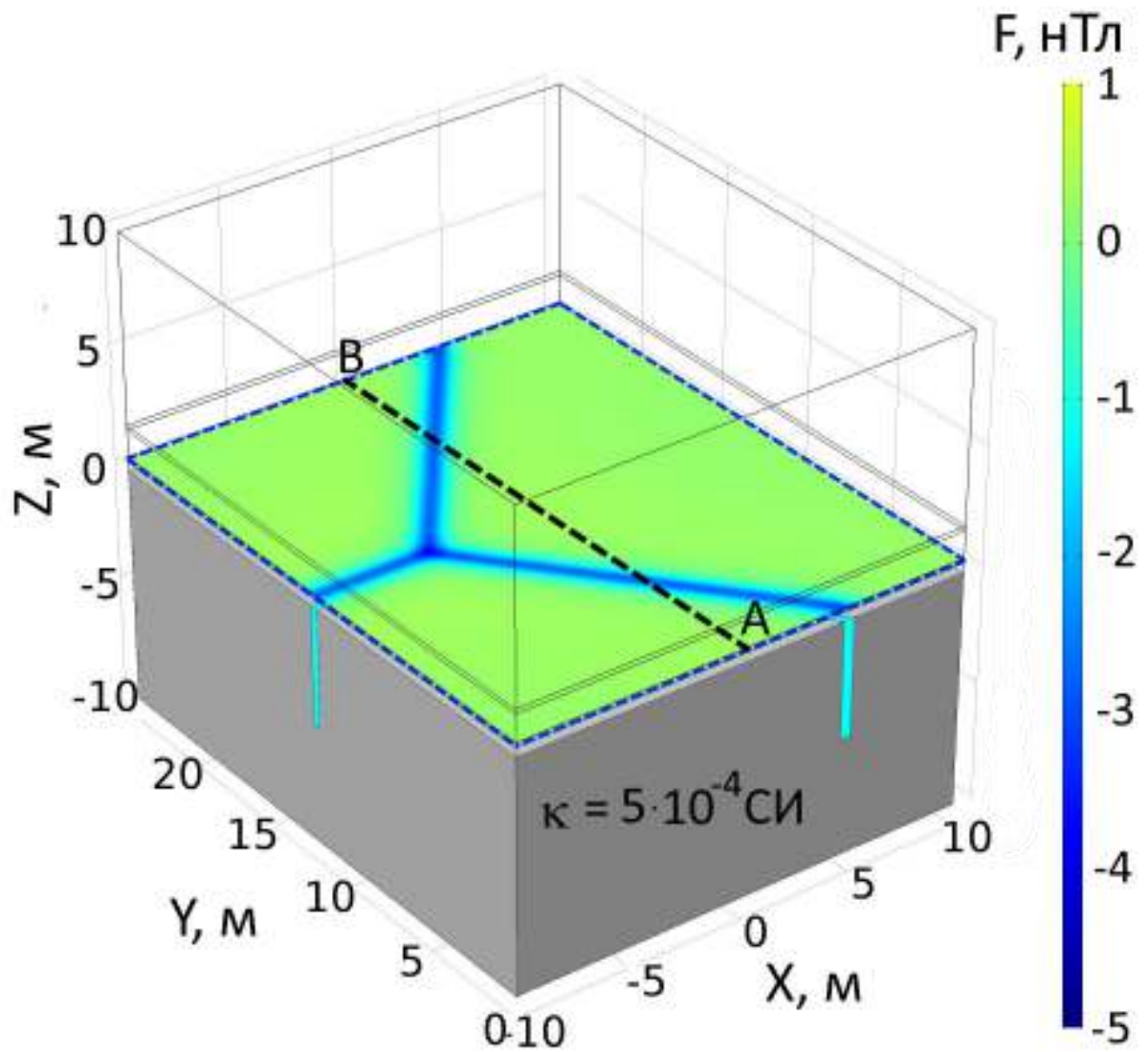


Рисунок 28 – Модель аномалии модуля вектора магнитной индукции на высоте 1,25 м над ледяной жилой

Пример сопоставления рассчитанных магнитных аномалий с наблюдаемыми представлен на рисунке 29.

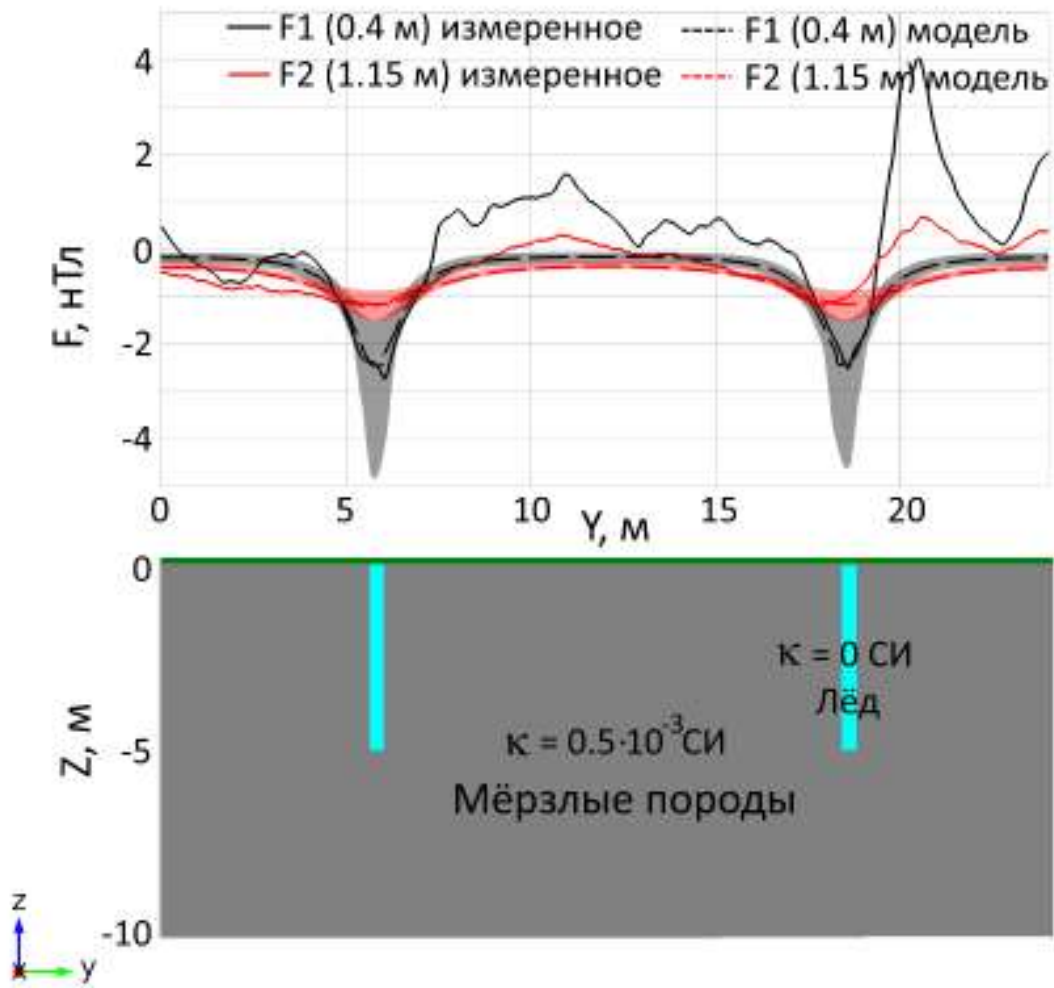


Рисунок 29 – Сравнение измеренных и рассчитанных магнитных аномалий на профиле  $X = 0$  м на высоте 0.4 м (F1) и 1.15 м (F2) над поверхностью на участке 1 (о. Самойловский); полупрозрачными областями (серым и красным цветом) указаны зоны разброса рассчитанных значений при изменении параметров модели на  $\pm 10\%$  и высоты наблюдения на  $\pm 20$  см

Как видно из рисунка 29, наблюдаемая аномалия может быть частично объяснена наличием ледовой жилы, внедрившейся в мёрзлый грунт. Контур отрицательной аномалии (Рисунок 22) совпадает с аномалией в магнитной модели (Рисунок 28) и наблюдается визуально и на аэрофотоснимке (Рисунок 19). Несмотря на это следует отметить существенное несоответствие измеренных и синтетических аномалий модуля вектора магнитной индукции (Рисунок 29), что может объясняться высокой степенью неоднородности магнитных свойств верхнего слоя отложений (Рисунок 25).

### 3.3.2 Участок 2: ледовый комплекс, о. Курунгнах

Исследуемый участок расположен на поверхности ледового комплекса вблизи эрозионного уступа. Как видно на фотографии, представленной на рисунке 30, в обнажении отчётливо просматриваются крупные сингенетические ледяные жилы в толще ледового комплекса плейстоценового возраста [Palaeoenvironmental dynamics..., 2008].



Рисунок 30 – Обнажение ледового комплекса на о. Курунгнах в стенке эрозионного уступа у Оленёкской протоки (фото автора)

Сверху эти отложения перекрыты слоем голоценовых отложений мощностью около 1 м, включающих эпигенетические ледяные жилы, которые также внедряются в толщу ледового комплекса. На поверхности зрительно просматриваются полигональные структуры, соответствующие расположению этих жил. Неровности поверхности вегетативного слоя не превышают 20 см. Полигональные структуры в рельефе просматриваются слабо. В растительном покрове различимы зоны неоднородности размером несколько метров, которые могут быть связаны с ледяными жилами. Общий вид поверхности представлен на рисунке 31.

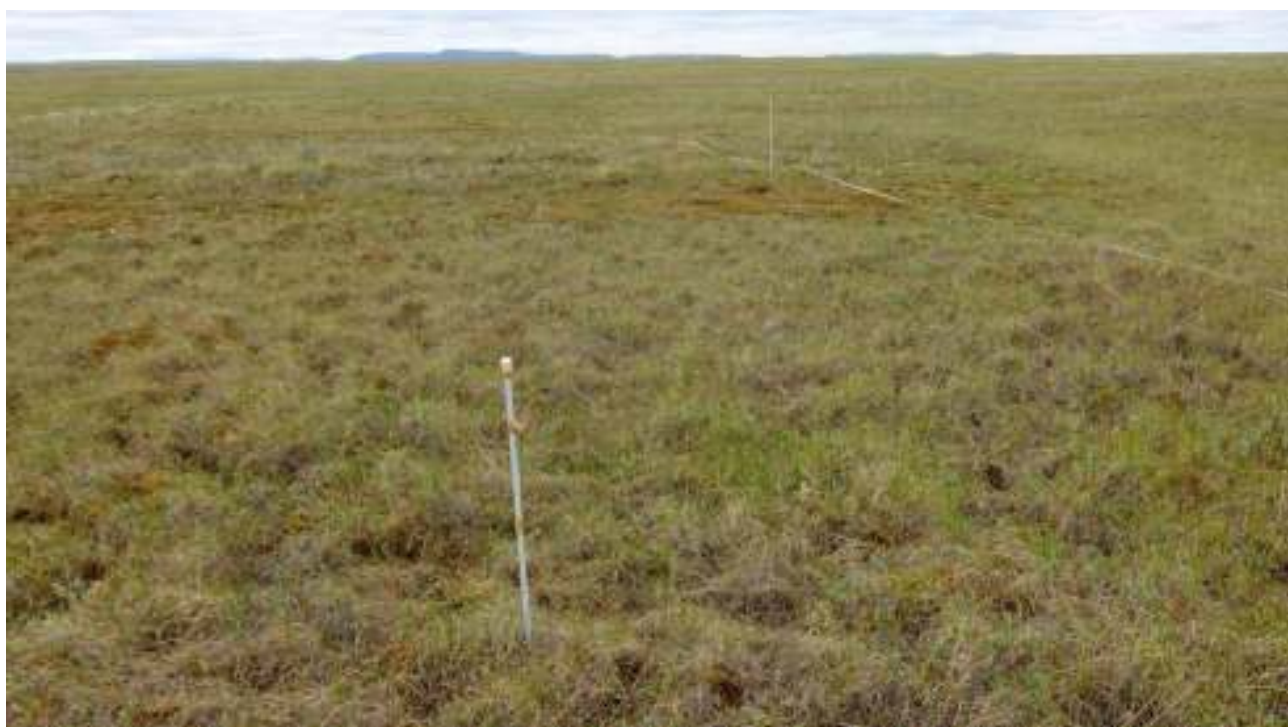


Рисунок 31 – Общий вид поверхности участка 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах, фото автора); высота столбиков - 1 м

Магнитная восприимчивость многолетнемёрзлых пород была измерена в нескольких точках в обнажении уступа (Рисунок 32) и составила от  $10^{-4}$  до  $0,5 \cdot 10^{-3}$  СИ.





Рисунок 32 – Мёрзлый грунт и ледовая жила в ледовом комплексе на о. Курунгнах (фото автора); точки измерения магнитной восприимчивости отложений ледового комплекса отмечены жёлтыми крестиками

Эрозионный уступ в последние годы продвигается вглубь острова, так что участок магнитной съёмки располагался ближе к краю уступа, чем показывает космоснимок данного района. Положение участка и уступа на момент съёмки показаны на рисунке 33.

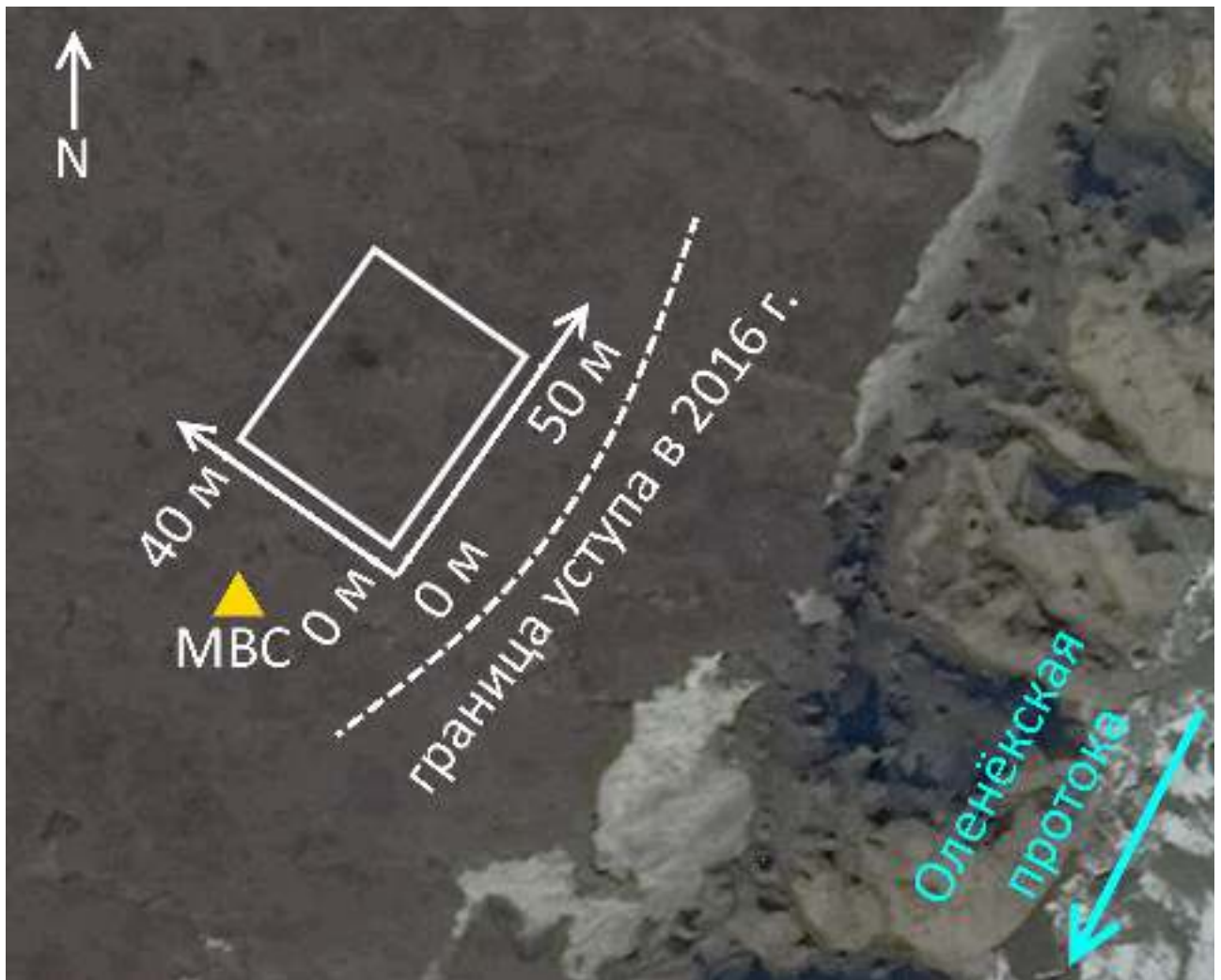


Рисунок 33 – Спутниковый снимок [Картографический сервис HERE...] участка 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах). Белым прямоугольником отмечены границы участка магнитной съёмки

Результаты магнитной съёмки представлены на рисунке 34.

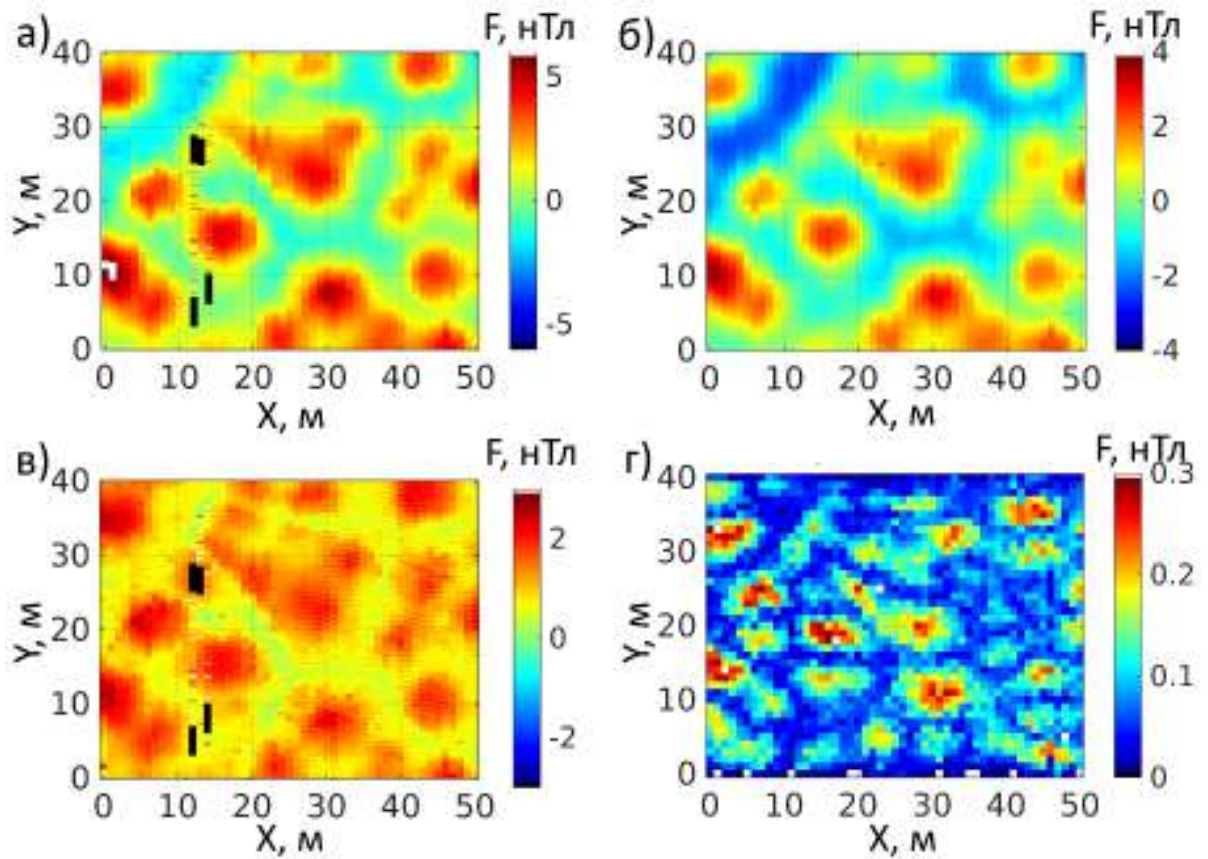


Рисунок 34 – Результаты магнитной съёмки на участке 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах): аномальные значения модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) на профилях съёмки для высоты 0.4 м (а) и 1.15 м (б), их разность, т. н. «вертикальный градиент», (в); распределение погрешности определения  $F$  в узлах сетки  $1 \times 1$  м на высоте 1.15 м (г); лакуны в данных, представленных на рисунках (а) и (в) вызваны техническими причинами, эти фрагменты были исключены при обработке

Карта аномальных значений модуля вектора магнитной индукции на высоте 1.15 м, приведена на рисунке 35.

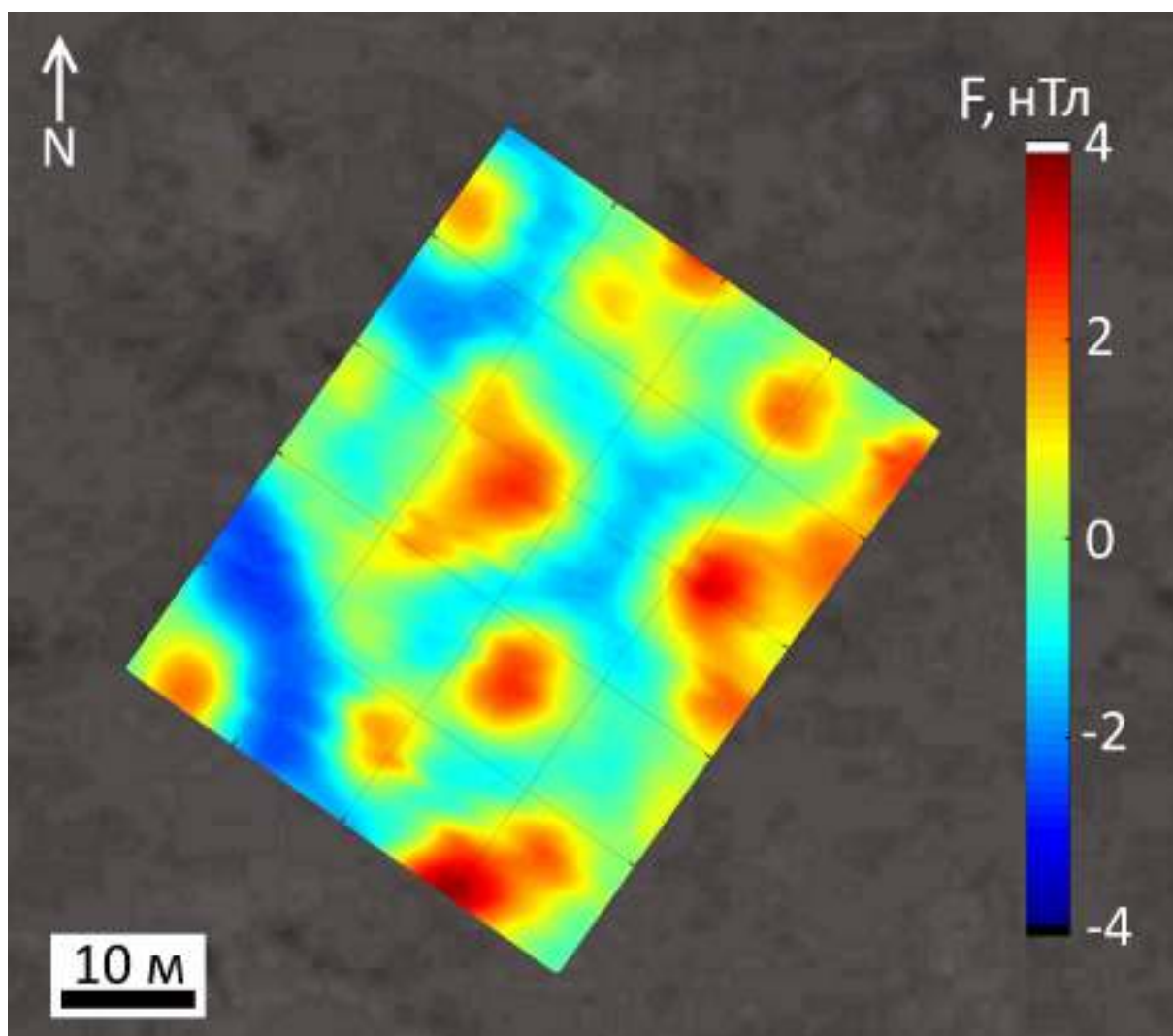


Рисунок 35 – Аномальные значения модуля вектора магнитной индукции на высоте 1.15 м над поверхностью

Как видно из рисунка 34, в магнитном поле проявляется сеть отрицательных аномалий, связанных, вероятно, с полигонально-жильными 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. Более детальный анализ аномалий был выполнен вдоль профиля АВ (Рисунок 36).

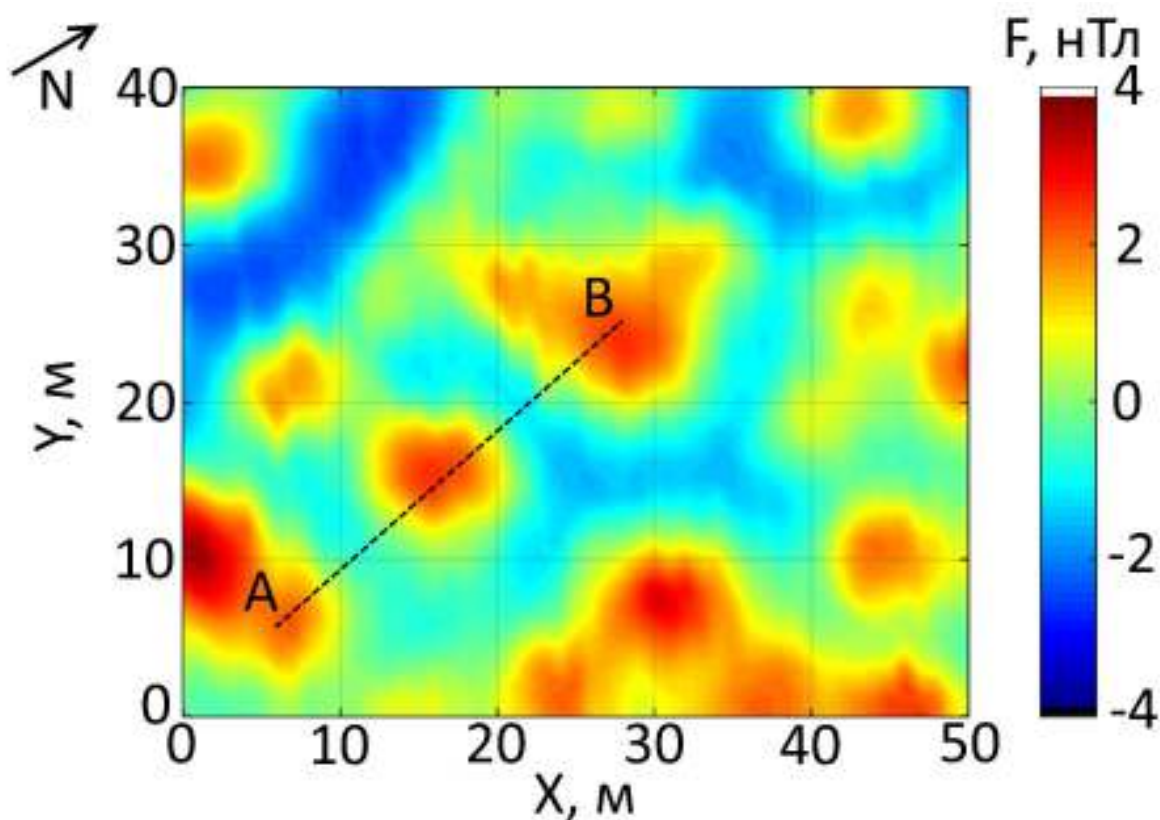


Рисунок 36 – Положение профиля АВ на карте магнитных аномалий

Аномалии модуля вектора магнитной индукции вдоль этого профиля на двух высотах, а также их разность («вертикальный градиент») представлены на рисунке 37.

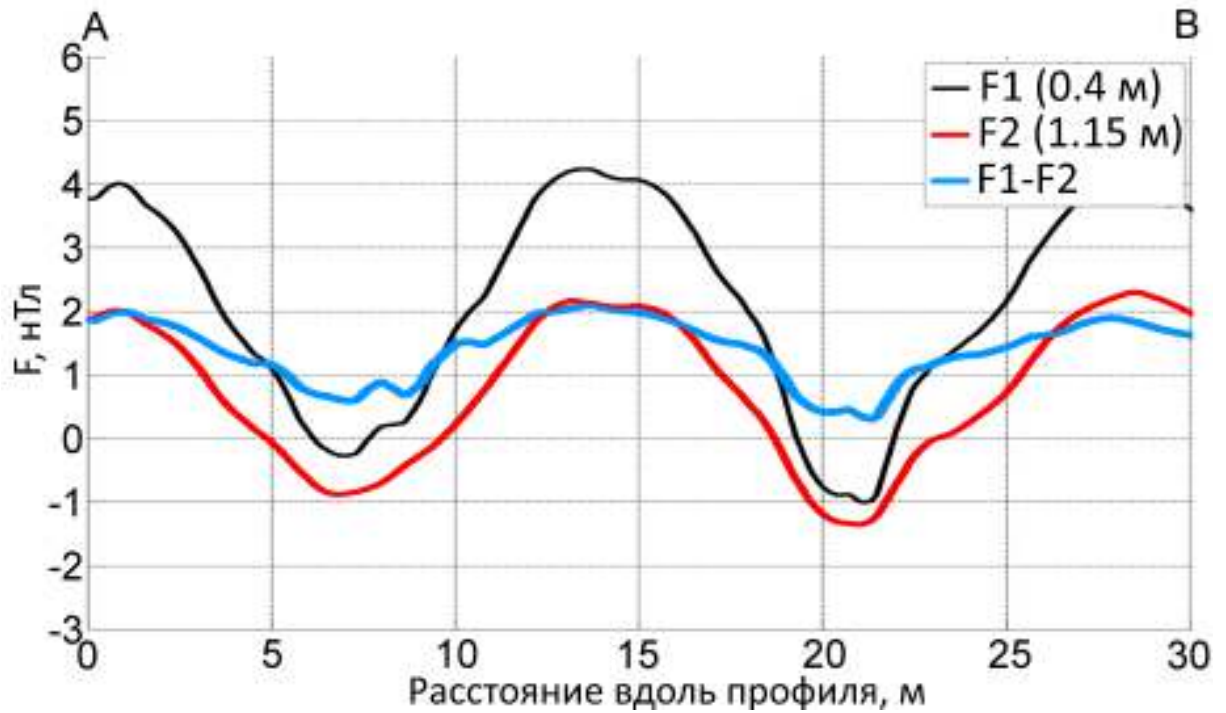


Рисунок 37 – Аномалии модуля вектора магнитной индукции вдоль профиля, пересекающего участок 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах)

При анализе данных вдоль профиля обращают на себя внимание повышенные значения разности модуля вектора магнитной индукции на двух уровнях: около 1,4 нТл/м при изменении высоты на 0,75 м. Для определения возможной причины этого было выполнено численное моделирование двух наиболее простых случаев, когда такой эффект имеет место.

Первая гипотеза заключается в том, что повышенный градиент может быть вызван близостью кромки уступа ледового комплекса. Вторая гипотеза предполагает наличие геологического объекта - источника магнитной аномалии. Таким объектом может быть, к примеру, сброс (или взброс) или эрозионный уступ в фундаменте. Возможность существования разлома в данном районе (вдоль Оленекской протоки) выдвигалась Большиановым Д. Ю. и соавторами в работе [Bolshiyarov, Makarov, Savelieva, 2015]. Для расчёта аномалии от уступа согласно первой гипотезе была построена численная модель уступа с соблюдением основных геометрических размеров.

Магнитная восприимчивость толщи ледового комплекса в модели принята

равной  $10^{-3}$  СИ (согласно измерениям, в обнажении и в образцах с участка магнитная восприимчивость пород ледового комплекса в верхней его части не превышает  $10^{-3}$  СИ). Результат моделирования согласно первой гипотезе представлен на рисунке 38.

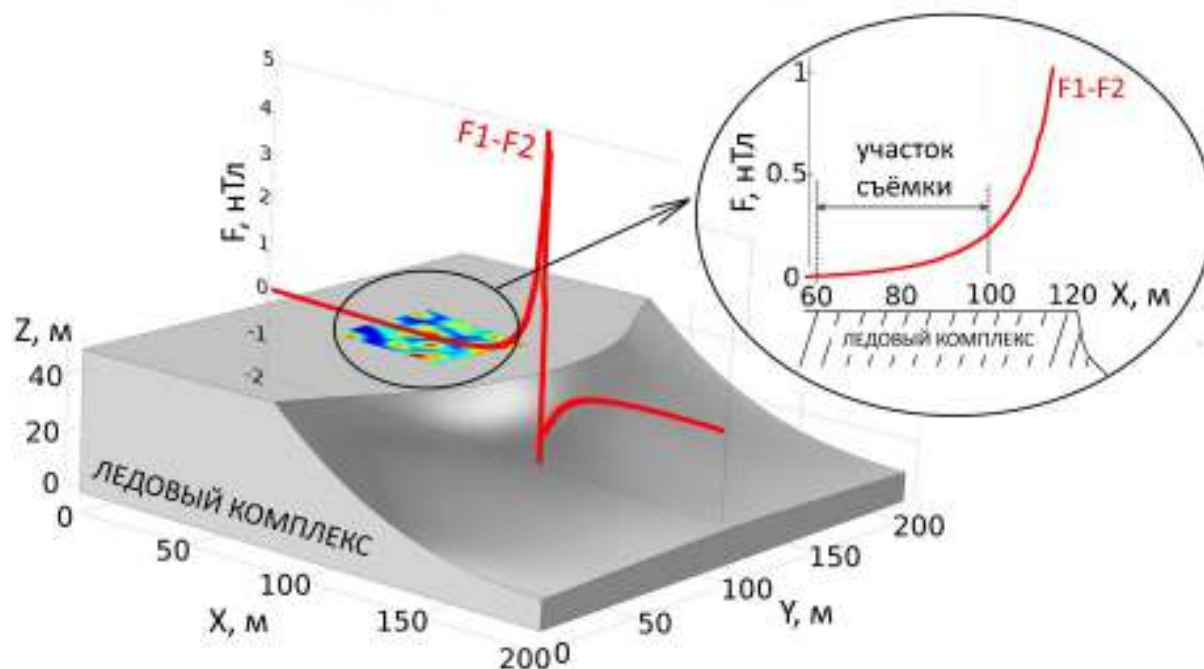


Рисунок 38 – Модель и результат расчёта разности значений модуля вектора магнитной индукции на высотах 0,4 и 1,15 м на участке 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах); источник магнитной аномалии - уступ ледового комплекса

Как видно из рисунка 38, принятого значения магнитной восприимчивости недостаточно для получения необходимой разности, при том, что нет фактических оснований увеличивать её значение в модели. Кроме того, результат моделирования показывает существенное изменение (в несколько раз) величины вертикального градиента при приближении к уступу. Этого не наблюдается в измеренных данных. Таким образом, гипотеза об уступе как источнике наблюдаемого повышенного значения вертикального градиента на участке не принимается.

Модель, отвечающая второй гипотезе – уступ в фундаменте (эрозионный либо в результате сдвига по разлому). Модель является квазидвумерной, т.е. протяжённость структуры намного больше её размеров в других двух измерениях.

Магнитная восприимчивость пород принята равной  $50 \cdot 10^{-3}$  СИ - характерное значение, наблюдаемое автором в эффузивных породах в скальных обнажениях г. Америка-Хая в северной части о. Курунгнах [Комплексные геолого-геофизические исследования..., 2015]. Магнитная восприимчивость многолетнемерзлых отложений принята равной  $10^{-3}$  СИ по аналогии с предыдущей моделью. Величина вертикального сдвига по разлому принята равной 50 м на основании предположений, приведённых в литературе [Bolshiyarov, Makarov, Savelieva, 2015], о причине поднятия западной части дельты и, в частности, о. Курунгнах на высоту более 40 м над восточной частью дельты. Глубина границы фундамента подбиралась так, чтобы достигалась необходимая величина разности модуля вектора магнитной индукции (1.5 нТл) на высотах 0,4 и 1,15 м. Результат моделирования представлен на рисунке 39.

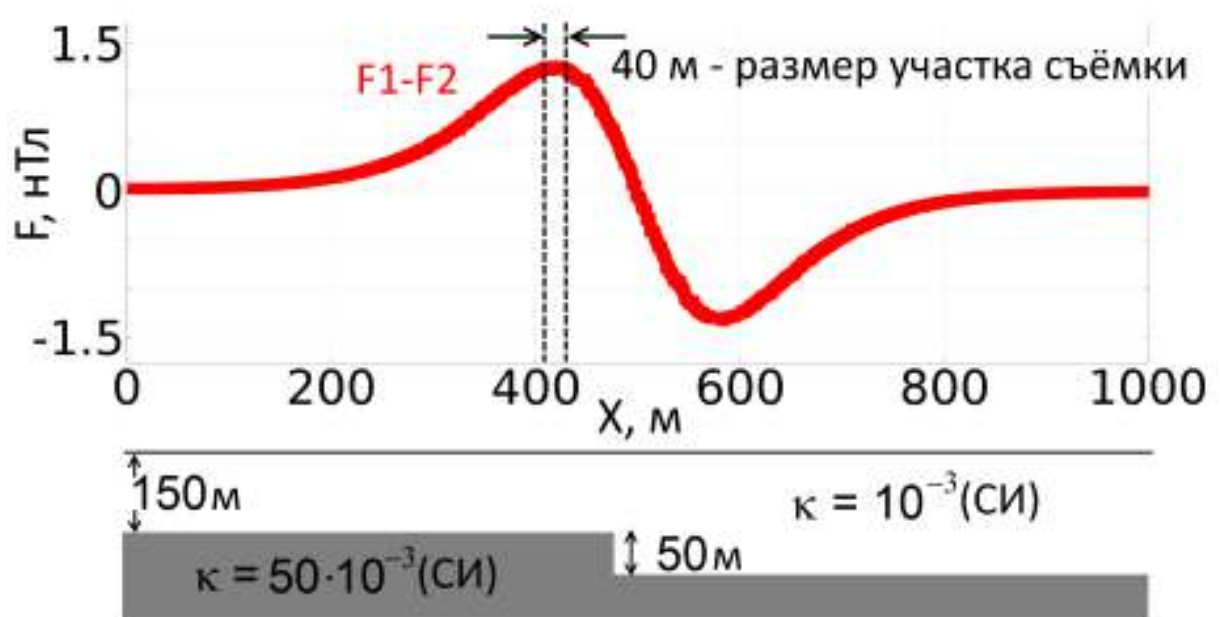


Рисунок 39 – Численная модель (вертикальный разрез): разность значений модуля вектора магнитной индукции на высотах 0,4 и 1,15 м ("вертикальный градиент") над поверхностью на участке 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах); источник магнитной аномалии - сброс в фундаменте

Как видно из рисунка 39, гипотеза о разломе либо уступе как источнике аномального вертикального градиента на участке является правдоподобной. В пределах участка такой источник может вызвать повышенные значения градиента



необходимой амплитуды. Эта амплитуда почти не меняется на протяжении участка вследствие удалённости источника, что также согласуется с результатами наблюдений.

Для интерпретации наблюдаемых аномалий от ледовых жил (рисунок 34) было рассмотрено несколько моделей. Сравнение результатов расчётов с измеренными значениями выполнялось вдоль профиля АВ, пересекающего границы трёх полигонов (Рисунок 35).

В модели 1 задано значение магнитной восприимчивости ( $\kappa$ ), линейно связанное с распределением наблюдаемого модуля вектора магнитной индукции на высоте 0.4 м над поверхностью зависимостью вида:

$$\kappa(x,y) = a \cdot F(x,y) + b, \quad (5)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, подобранные эмпирически. Такое задание распределения магнитной восприимчивости обосновано низкой высотой наблюдения, вертикальной протяжённостью источников аномалий (ледяные жилы) и большим углом магнитного наклона в регионе. Общий вид модели представлен на рисунке 40.

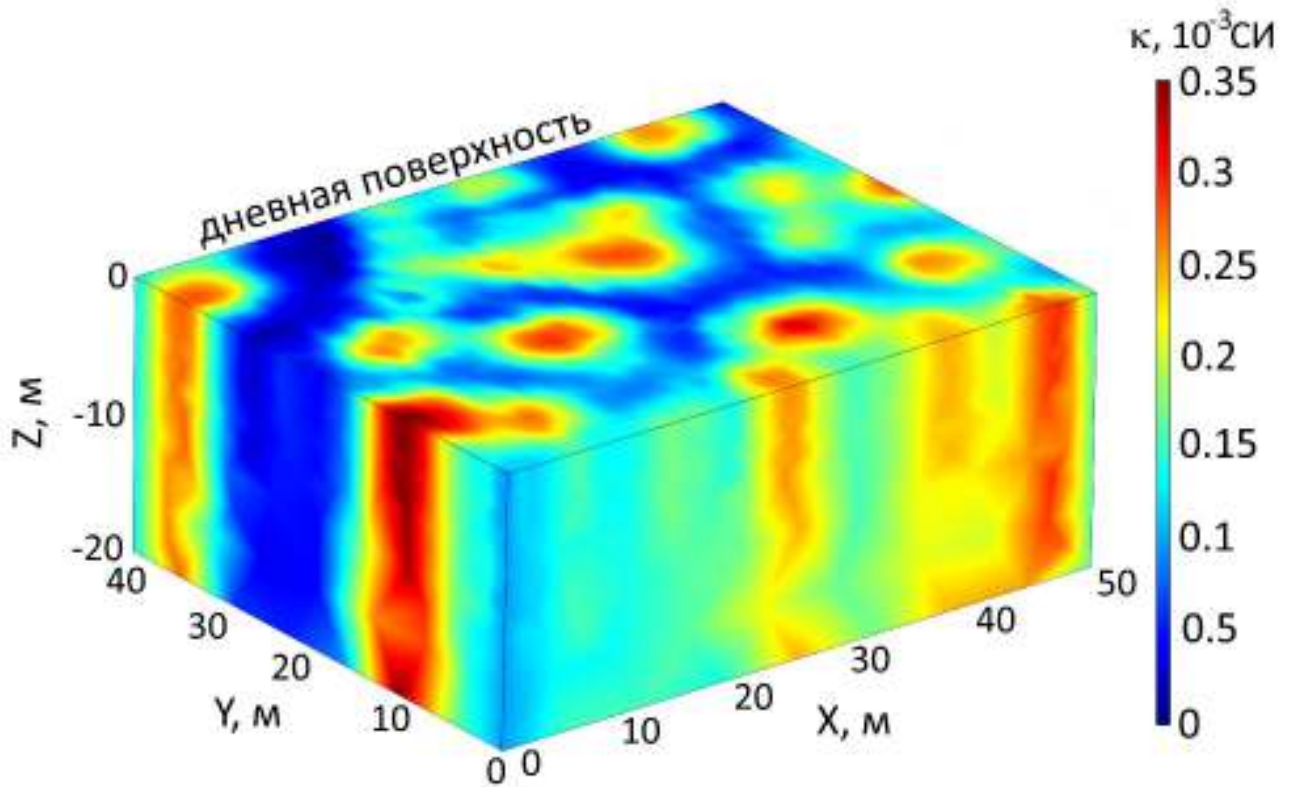


Рисунок 40 – Распределение магнитной восприимчивости в модели 1 участка 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах)

На рисунке 41 представлено сравнение результатов моделирования с данными полевых измерений.

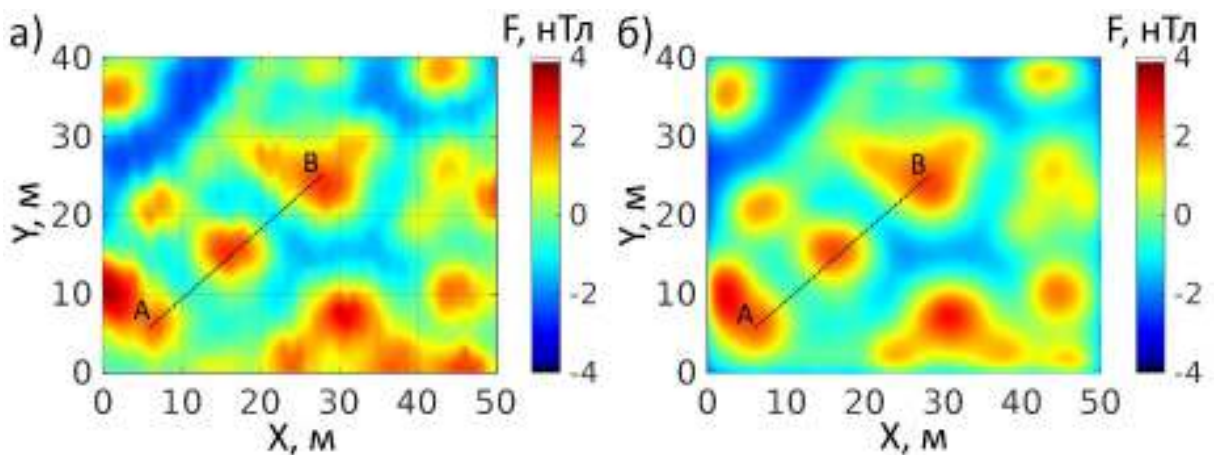


Рисунок 41 – Аномалии модуля вектора магнитной индукции на участке 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах) по данным полевых наблюдений (а) и полученные в результате моделирования (б).

Разрез модели 1 по профилю АВ (Рисунок 41) представлен на рисунке 42.

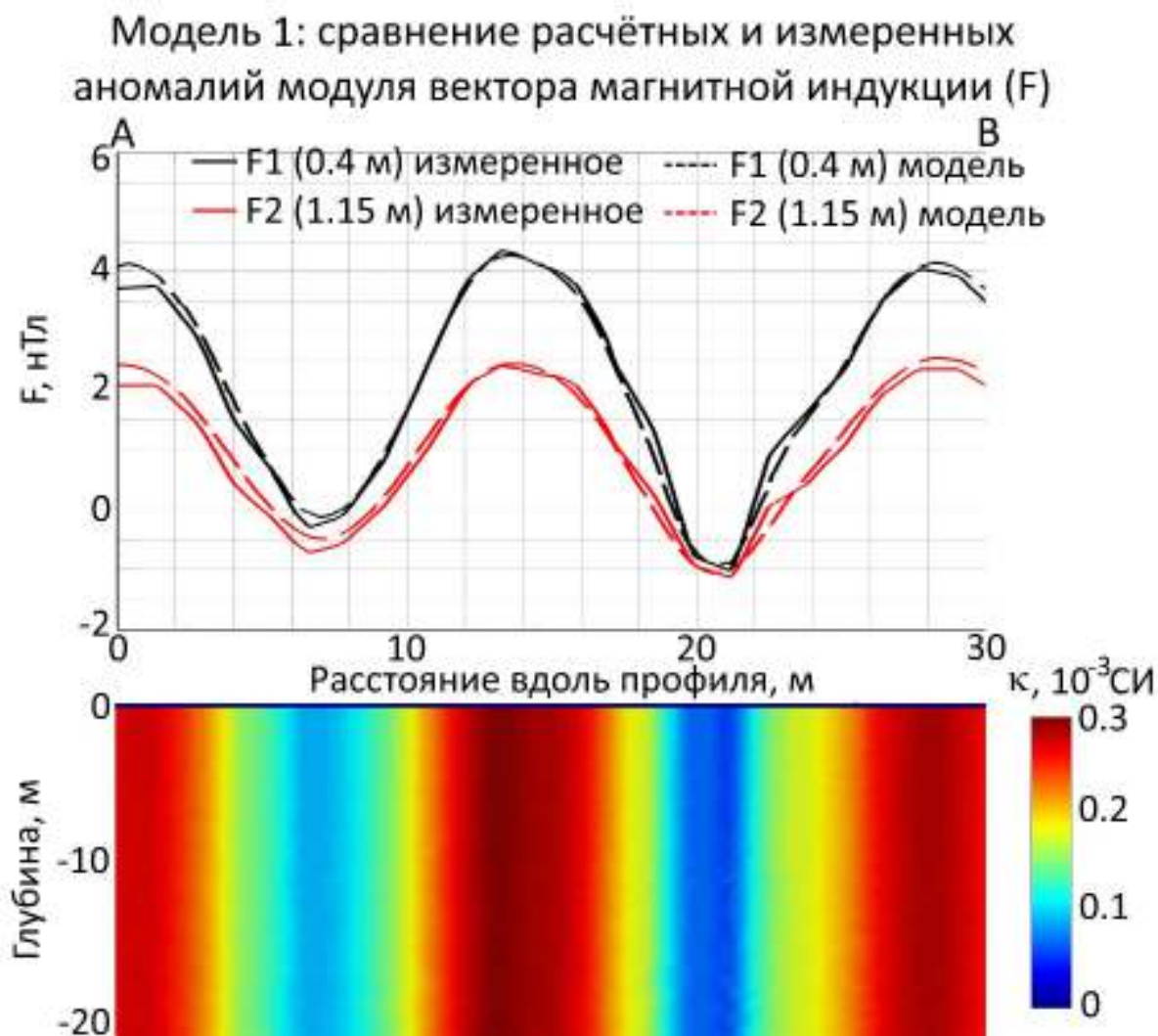


Рисунок 42 – Сравнение аномалий модуля вектора магнитной индукции, измеренных на участке 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах) с рассчитанными в модели 1; разрез модели представлен в нижней части рисунка

Как видно из рисунка 42, результат моделирования хорошо совпадает с измеренными значениями. Недостаток данной модели заключается в следующих расхождениях с геологической информацией:

1. Не учтена двухслойная структура отложений ледового комплекса, отсутствует система ледовых жил, связанных с голоценовыми отложениями в верхней части разреза.

2. Трудно объяснимо латеральное изменение магнитной восприимчивости в пределах ледяных жил. Оно может быть объяснено возможной дифференциацией вещества в процессе формирования полигонов. Этот фактор будет учтён ниже в

моделях 4 и 5.

Модель 2 представляет из себя регулярную двухслойную структуру, состоящую из шестиугольных элементов (мёрзлый грунт) с заполнением льдом между ними (ледяные жилы). Магнитная восприимчивость принимает значение 0 (лёд) либо положительное (мёрзлый грунт). С учётом информации о строении жил в работе [Palaeoenvironmental dynamics..., 2008] дополнительно принято условие: мощность ледяных жил в нижнем слое больше, чем в верхнем. Общий вид модели представлен на рисунке 43.

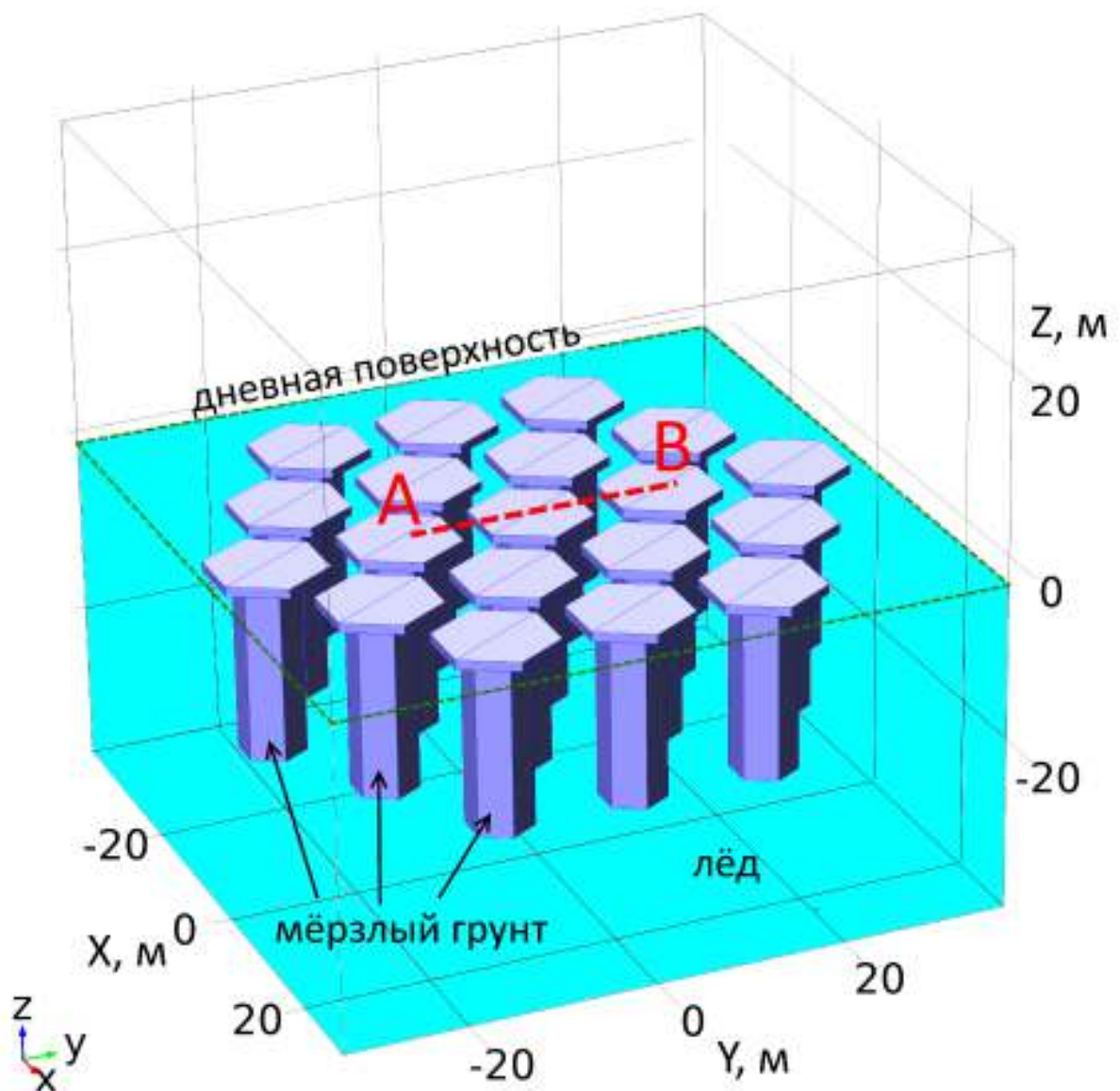


Рисунок 43 – Общий вид модели участка 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах) с полигонально-жильными льдами

На рисунке 44 изображён разрез модели по вдоль направления профиля АВ (Рисунок 43) с указанием параметров, по которым осуществлялся подбор.

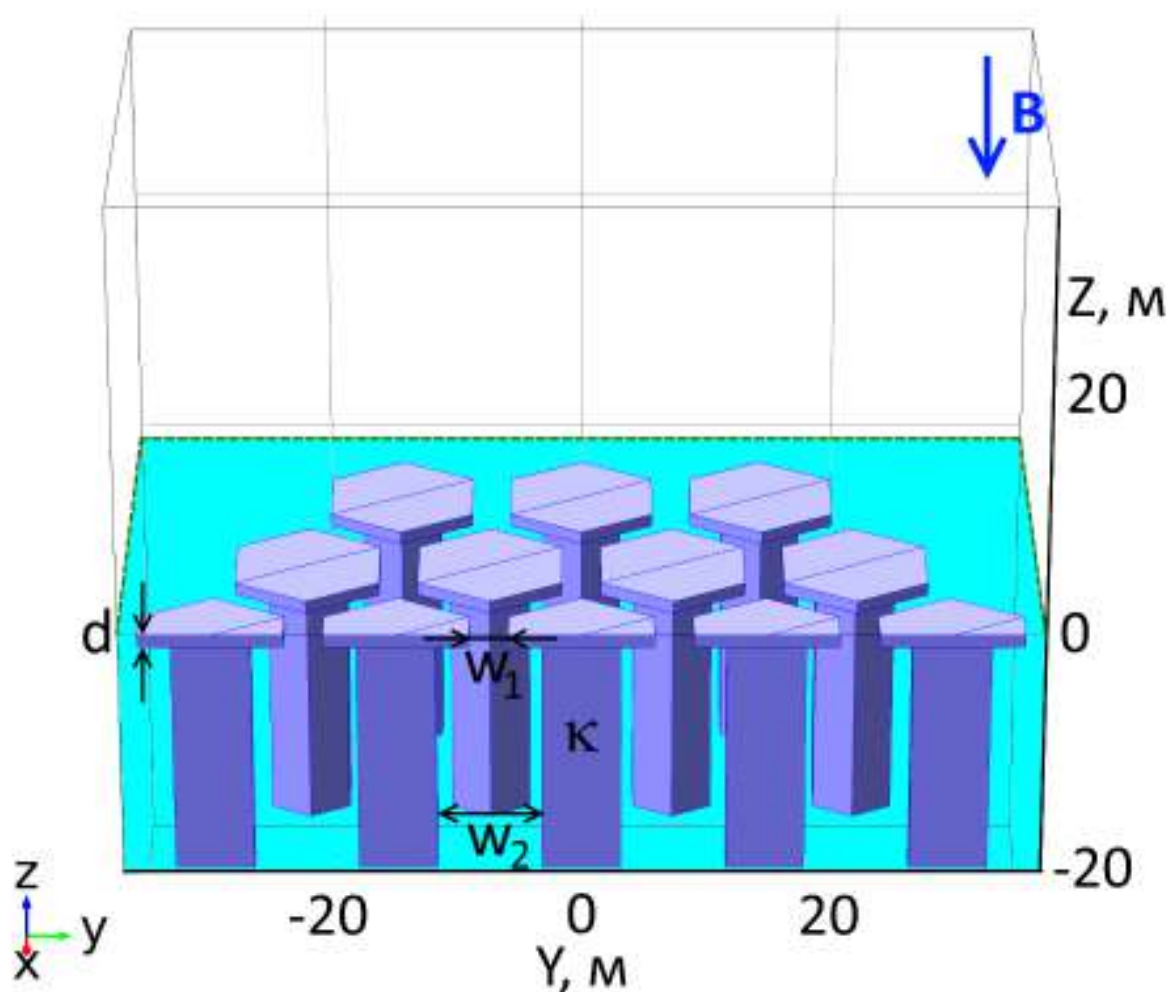


Рисунок 44 – Модель участка 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах) в разрезе, буквами указаны параметры, по которым осуществлялся подбор прямой задачи магниторазведки:  $w_1$  – ширина жил в верхнем слое,  $w_2$  – ширина жил в нижнем слое,  $\kappa$  – магнитная восприимчивость мёрзлого грунта,  $d$  – мощность верхнего слоя

В процессе подбора параметры варьировались в следующих пределах:  $w_1$ : 0, 0.5, ... 5 м,  $w_2$ : 0, 1, ... 10 м,  $d$ : 0, 0.5, ... 3 м,  $\kappa$ : 0, 0.1, ...  $0.5 \cdot 10^{-3}$  СИ. Примеры расчёта аномалий модуля вектора магнитной индукции по профилю АВ с различными комбинациями параметров представлен на рисунке 45.



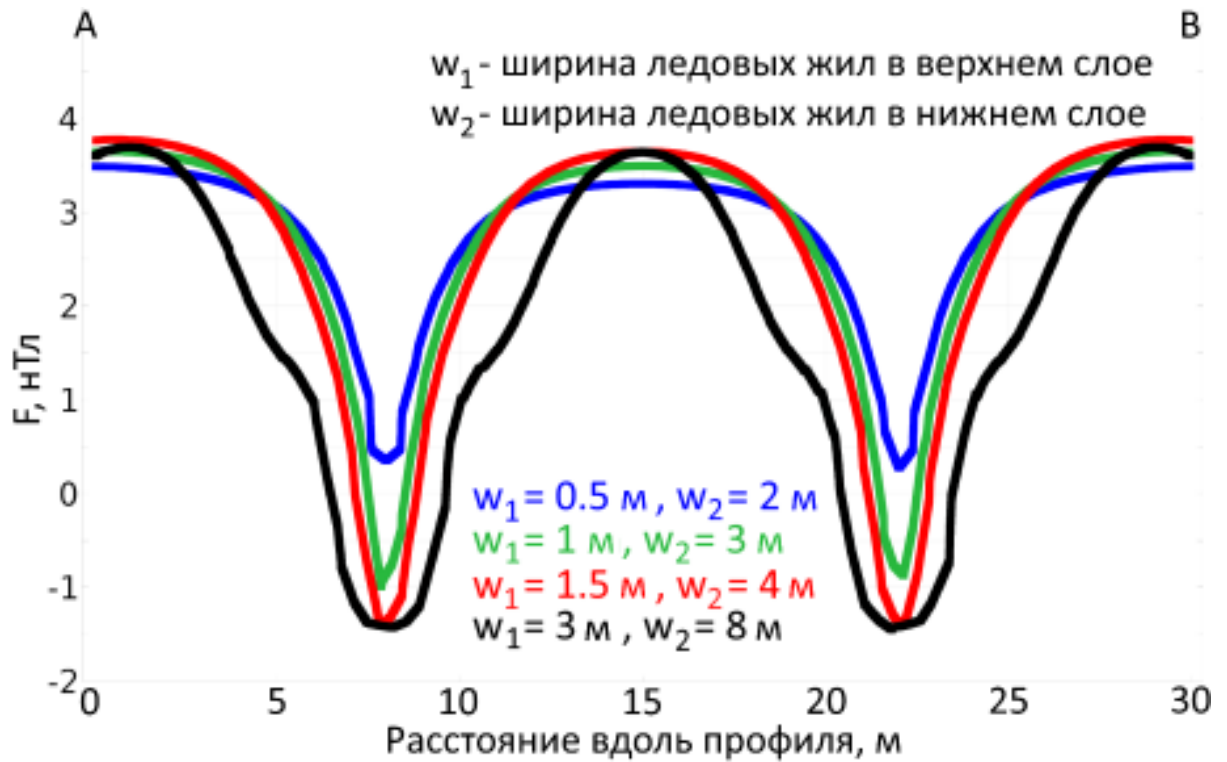


Рисунок 45 – Результаты расчёта аномальных значений модуля вектора магнитной индукции на высоте 1.15 м над поверхностью с различными значениями параметров  $w_1$  (ширина жил верхнего слоя) и  $w_2$  (ширина жил нижнего слоя). Мощность верхнего слоя  $d = 1 \text{ м}$ , магнитная восприимчивость  $\kappa = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ СИ}$

Полученная в результате перебора параметров оптимальная модель в разрезе вдоль профиля АВ представлена на рисунке 46.

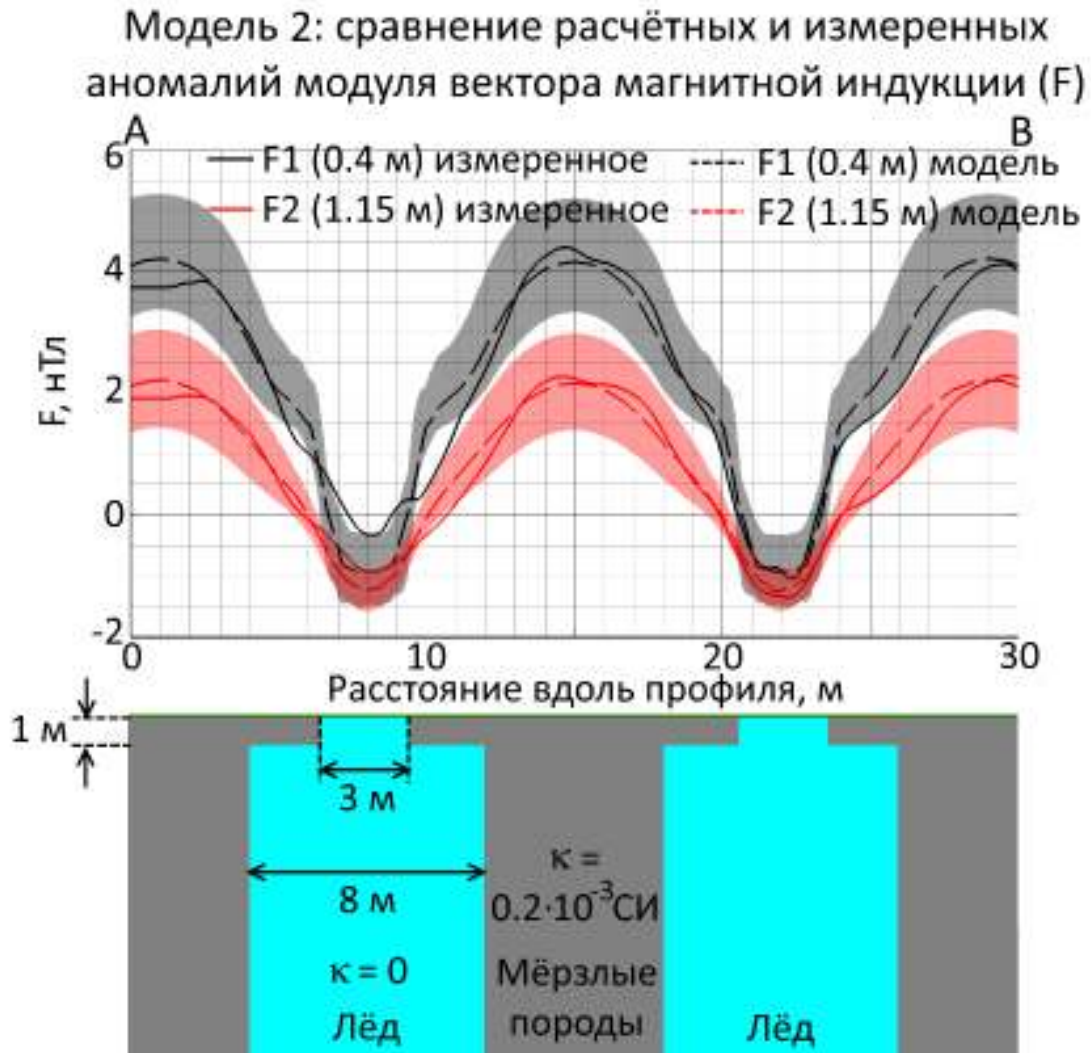


Рисунок 46 – Сравнение аномалий модуля вектора магнитной индукции, измеренных на участке 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах), с рассчитанными в модели 2; разрез модели представлен в нижней части рисунка; полупрозрачными областями (серым и красным цветом) указаны зоны разброса рассчитанных значений при слабом изменении параметров модели (см. раздел 3.2.4)

Невязка подобранных в модели аномалий с измеренными, рассчитанная по формуле (4), составила 0.45 нТл. Ширина ледяных жил в данной модели заметно превышает ширину, оцененную на основании полевых наблюдений, – 0,5-1,5 м в верхнем слое и 2-4 м в толще ледового комплекса [Palaeoenvironmental dynamics..., 2008].

Ограничение ширины жил в нижнем слое тремя метрами (в таком случае, набор значений параметров –  $w_1$ : 0, 0.5, ... 10 м,  $w_2 = 3$  м,  $d$ : 0, 0.5, ... 3 м,  $k$ : 0, 0.1, ...  $0.5 \cdot 10^{-3}$  СИ) приводит в данной постановке к решению, представленному на

рисунке 47 (модель 3).

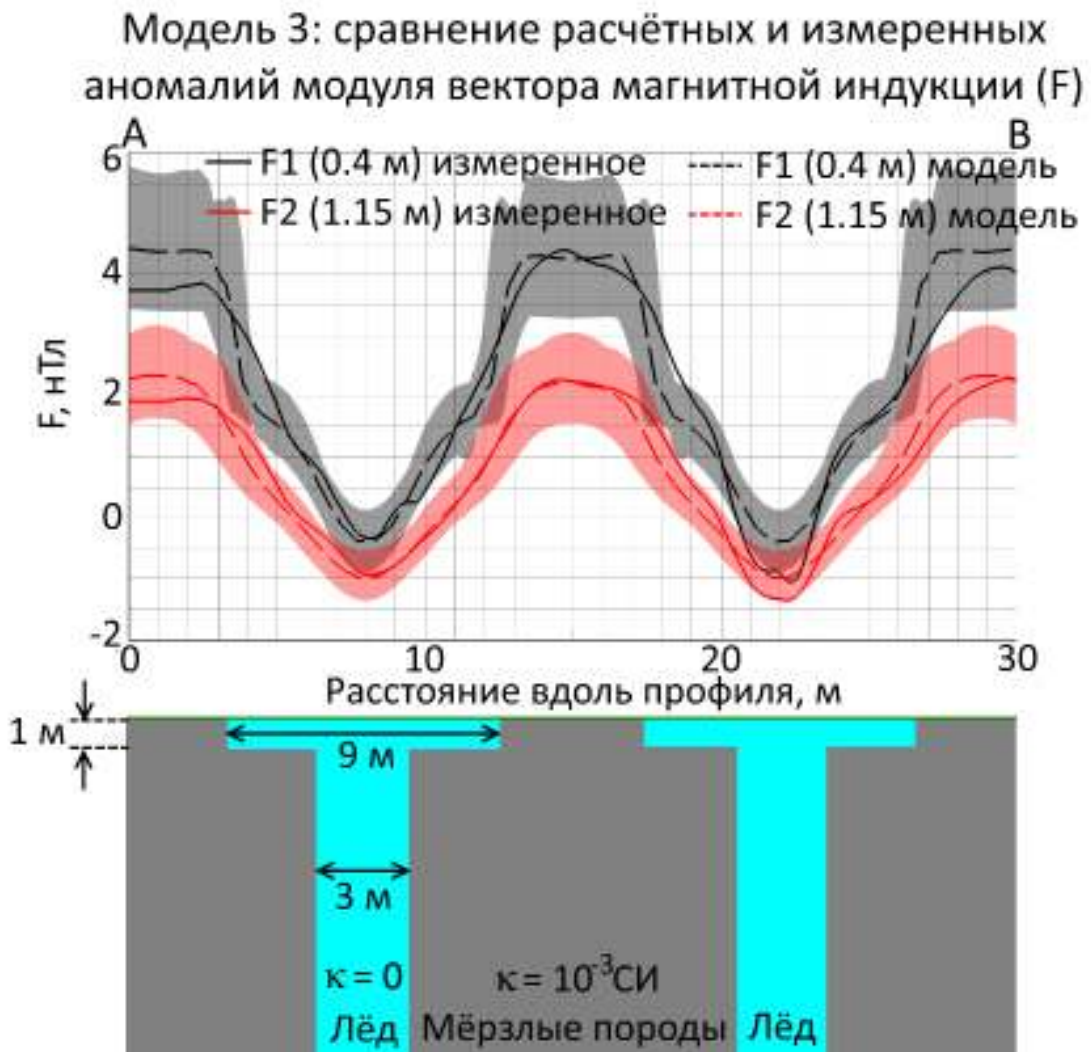


Рисунок 47 – Сравнение аномалий модуля вектора магнитной индукции, измеренных на участке 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах), с рассчитанными в модели 3; разрез модели представлен в нижней части рисунка 49; полупрозрачными областями (серым и красным цветом) указаны зоны разброса рассчитанных значений при слабом изменении параметров модели (см. раздел 3.2.4)

Ширина ледяных включений в верхнем слое (здесь их невозможно назвать жилами по причине отсутствия их продолжения вниз) в данном случае достигает 9 м. При этом магнитная восприимчивость мёрзлого грунта достигает  $10^{-3}$  СИ, чего не обнаружено по данным капаметрии.

Как видно из приведённых решений, подбор наблюдаемых аномалий при условии фиксированной ширины жил ледового комплекса, равной 3 м, требует



усложнения модели. В модели 4 заданы следующие условия  $w_1 = 1$  м,  $w_2 = 3$  м,  $d$ : 0, 0.5, ... 3 м, магнитная восприимчивость  $\kappa$ :

$$\kappa = \kappa_0 \cdot e^{-r/p}, \quad (6)$$

где  $\kappa_0$  (максимальная восприимчивость в слое) =  $0.2 \cdot 10^{-3}$  СИ,  $r$  – расстояние от центра полигона по горизонтали,  $p$  принимает значения: 10, 11, ... 20 м. Экспоненциальная зависимость здесь выбрана как одна из наиболее простых функций, позволяющих описать плавное радиальное уменьшение содержания ферромагнетиков от центра к краям полигонов. Подобное 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]. Результат подбора модели 4 представлен на рисунке 48.

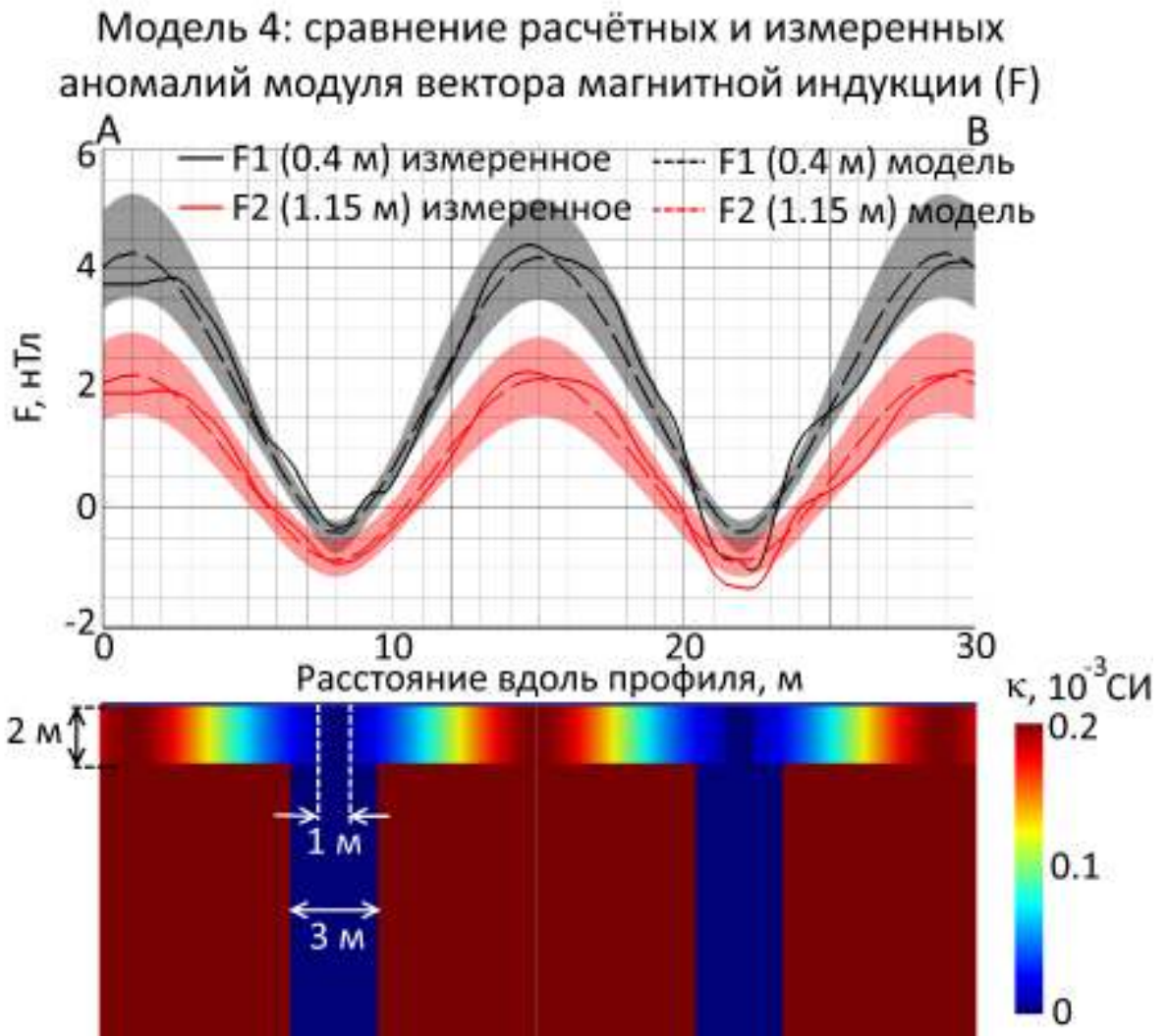


Рисунок 48 – Сравнение аномалий модуля вектора магнитной индукции, измеренных на участке 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах), с рассчитанными в модели 4. Разрез модели представлен в нижней части рисунка. Полупрозрачными областями (серым и красным цветом) указаны зоны разброса рассчитанных значений при слабом изменении параметров модели (см. раздел 3.2.4)

Мощность голоценовых отложений в модели 4 оценена в 2 м. Повышение значения  $k_0$  в выражении (5) до  $0,5 \cdot 10^{-3}$  СИ (модель 5) позволяет получить в результате подбора мощность этого слоя равную 0,7 м, что весьма близко к мощности, наблюдаемой в обнажении [Palaeoenvironmental dynamics..., 2008]. Результат расчёта приведён на рисунке 49.

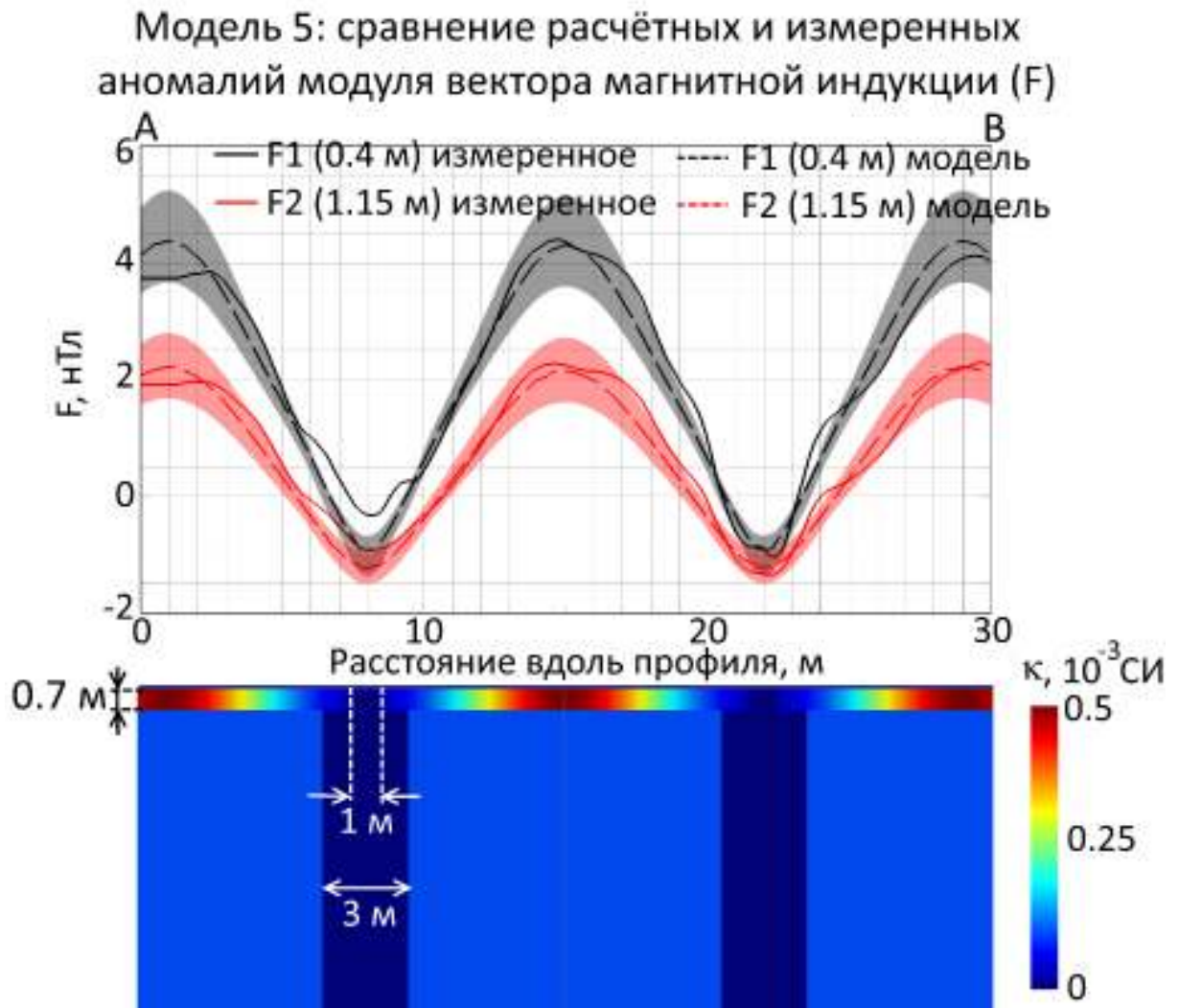


Рисунок 49 – Сравнение аномалий модуля вектора магнитной индукции, измеренных на участке 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах), с рассчитанными в модели 5. Разрез модели представлен в нижней части рисунка. Полупрозрачными областями (серым и красным цветом) указаны зоны разброса рассчитанных значений при слабом изменении параметров модели (см. раздел 3.2.4)

Последняя из моделей 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.



### 3.3. 3 Участок 3, алас, о. Курунгнах

Третий участок исследований имеет наиболее сложное строение. Он расположен на склоне дренированного аласа. На дне аласа отчётливо видны полигональные структуры. Склон аласа покрыт солифлюкционными отложениями. Аэрофотоснимок участка представлен на рисунке 50.

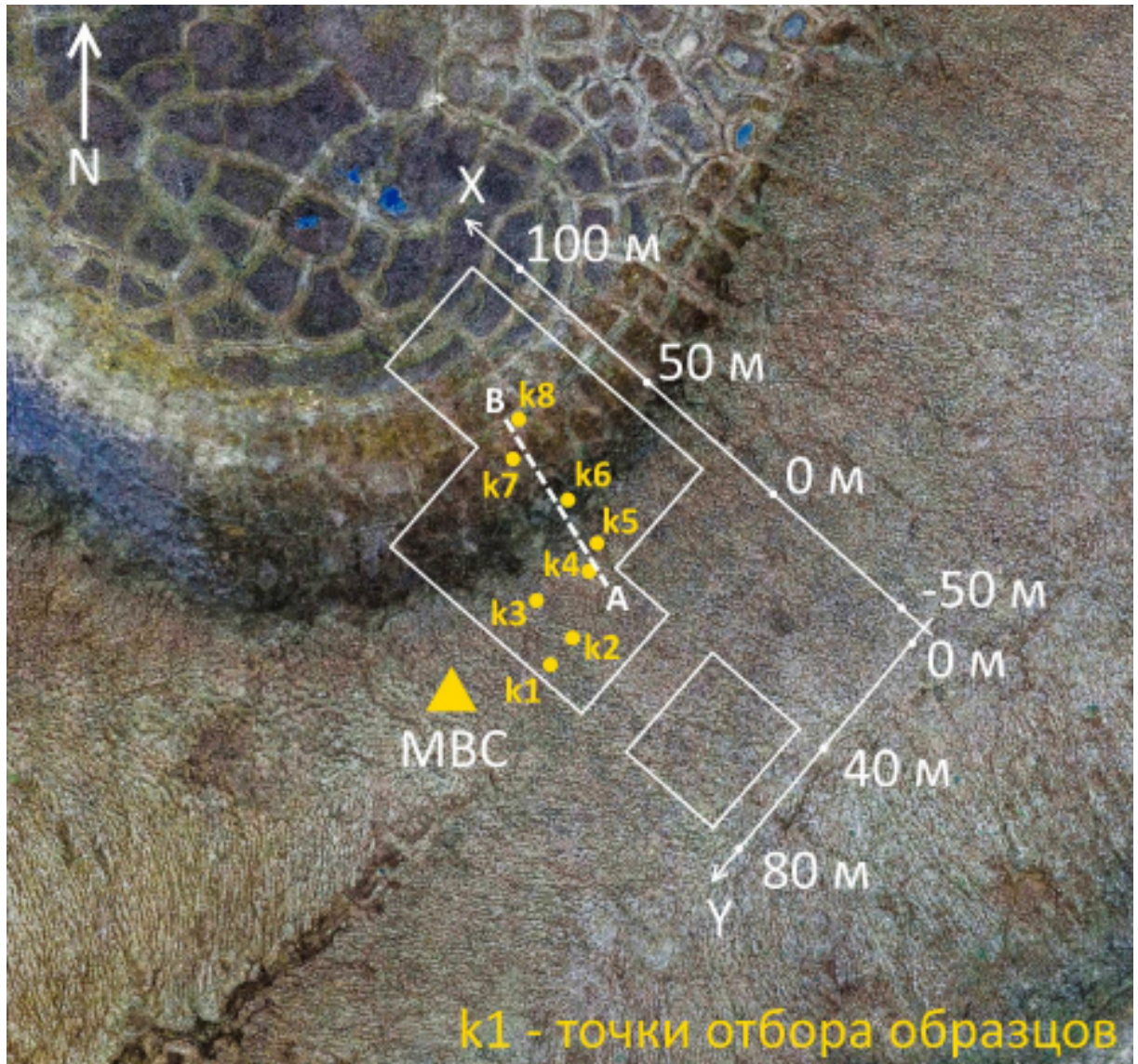


Рисунок 50 – Схема наблюдений на участке съёмки: профили выполнялись в направлении оси Y, расстояние между профилями - 1 м; MBC - расположение магнитовариационной станции; основа – аэрофотоснимок с увеличенной контрастностью

Перепад высот в пределах участка съёмки составляет почти 20 м (рисунок 51).

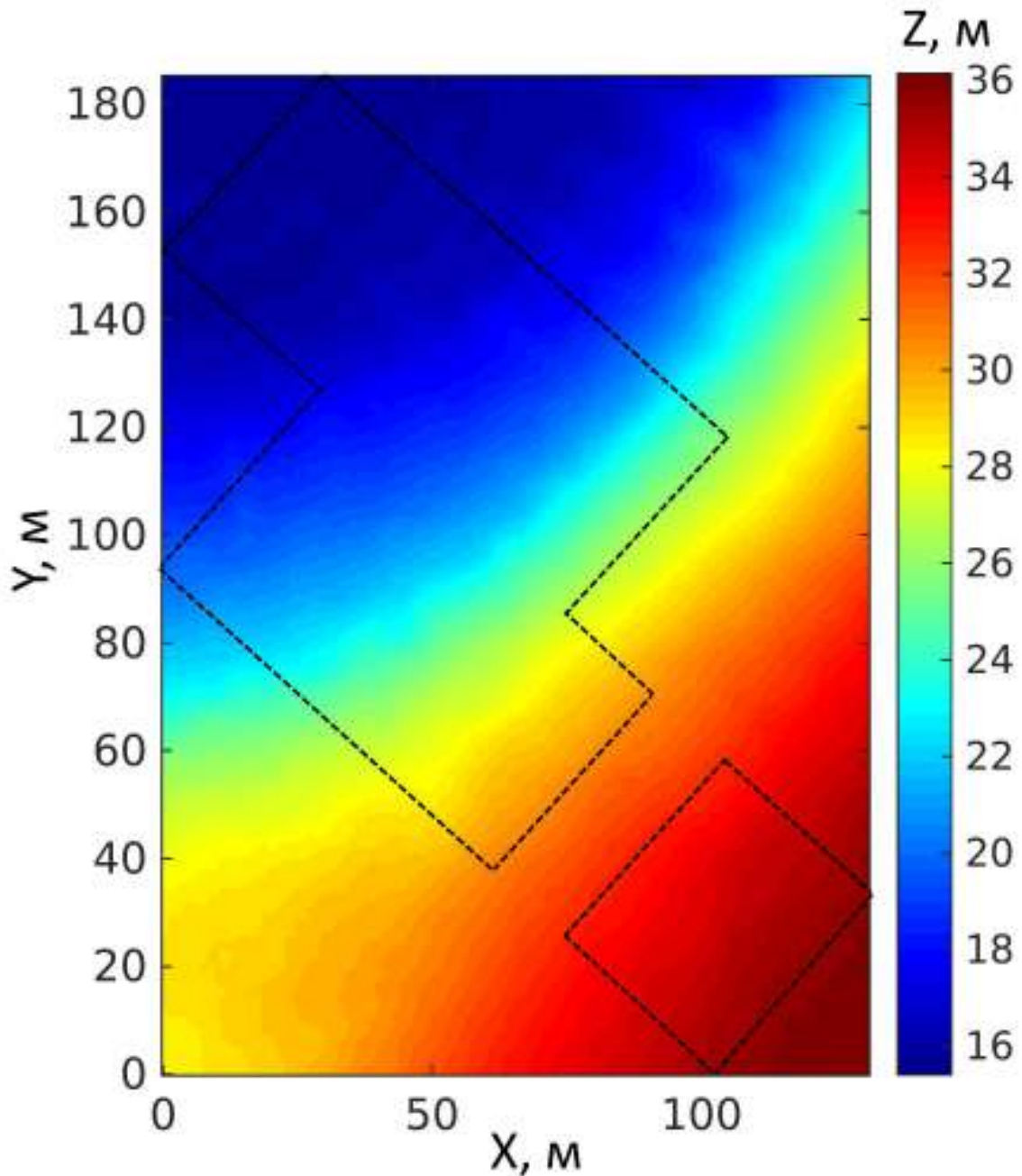


Рисунок 51 – Карта высот на участке 2 (ледовый комплекс, о. Курунгнах). Пунктиром выделен участок магнитной съёмки

Считая строение ледового комплекса на этом участке аналогичным строению участка 2, рассмотренному выше, можно предположить, что здесь также существовали голоценовые полигональные структуры, но были изменены процессом солифлюкции, так что их структура не сохранилась. Необходимо отметить, что на данном участке вследствие солифлюкции возник микрорельеф, с существенно большими перепадами высот в сравнении с первыми двумя



участками. Этот микрорельеф мог оказать влияние на результаты магнитной съёмки: во-первых, оператор при съёмке движется с огибанием рельефа, во-вторых, форма верхней границы отложений может являться причиной возникновения магнитных аномалий. Микрорельеф участка представлен на рисунке 52.

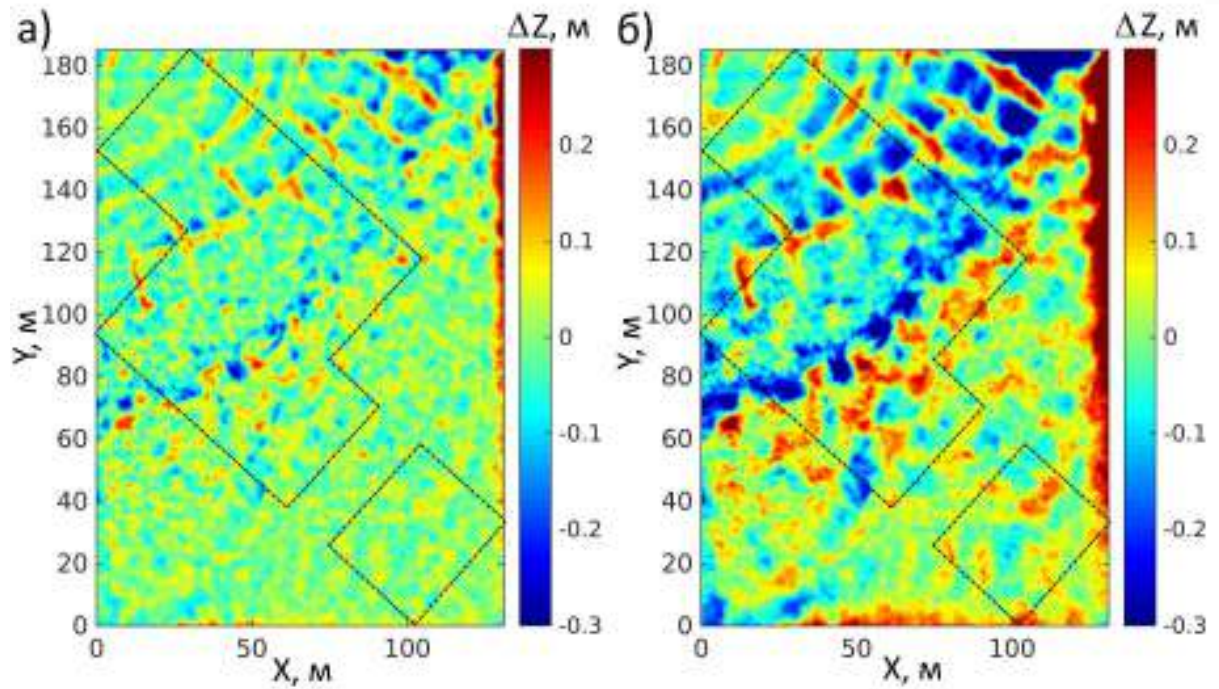


Рисунок 52 – Микрорельеф участка 3 (алас, о. Курунгнах) отклонения от рельефа, усредненного с радиусом 5 (а) и 10 (б) м

Результаты магнитной съёмки на данном участке представлены на рисунке 53.

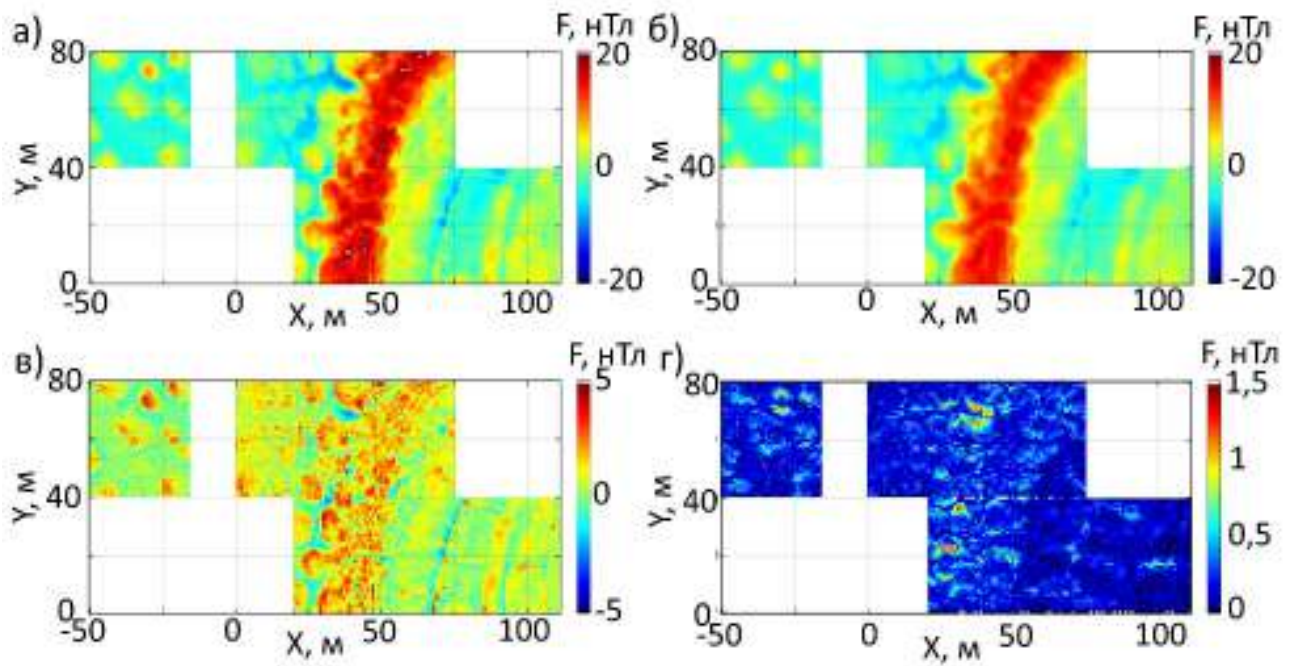


Рисунок 53 – Результаты магнитной съёмки на участке 2 (алас, о. Курунгнах): аномальные значения модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) на профилях съёмки для высоты 0.4 м (а) и 1.15 м (б), их разность, т. н. «вертикальный градиент», (в); распределение погрешности определения  $F$  в узлах сетки  $1 \times 1$  м на высоте 1.15 м (г)

Карта аномальных значений модуля вектора магнитной индукции на высоте 1.15 м приведена на рисунке 54.

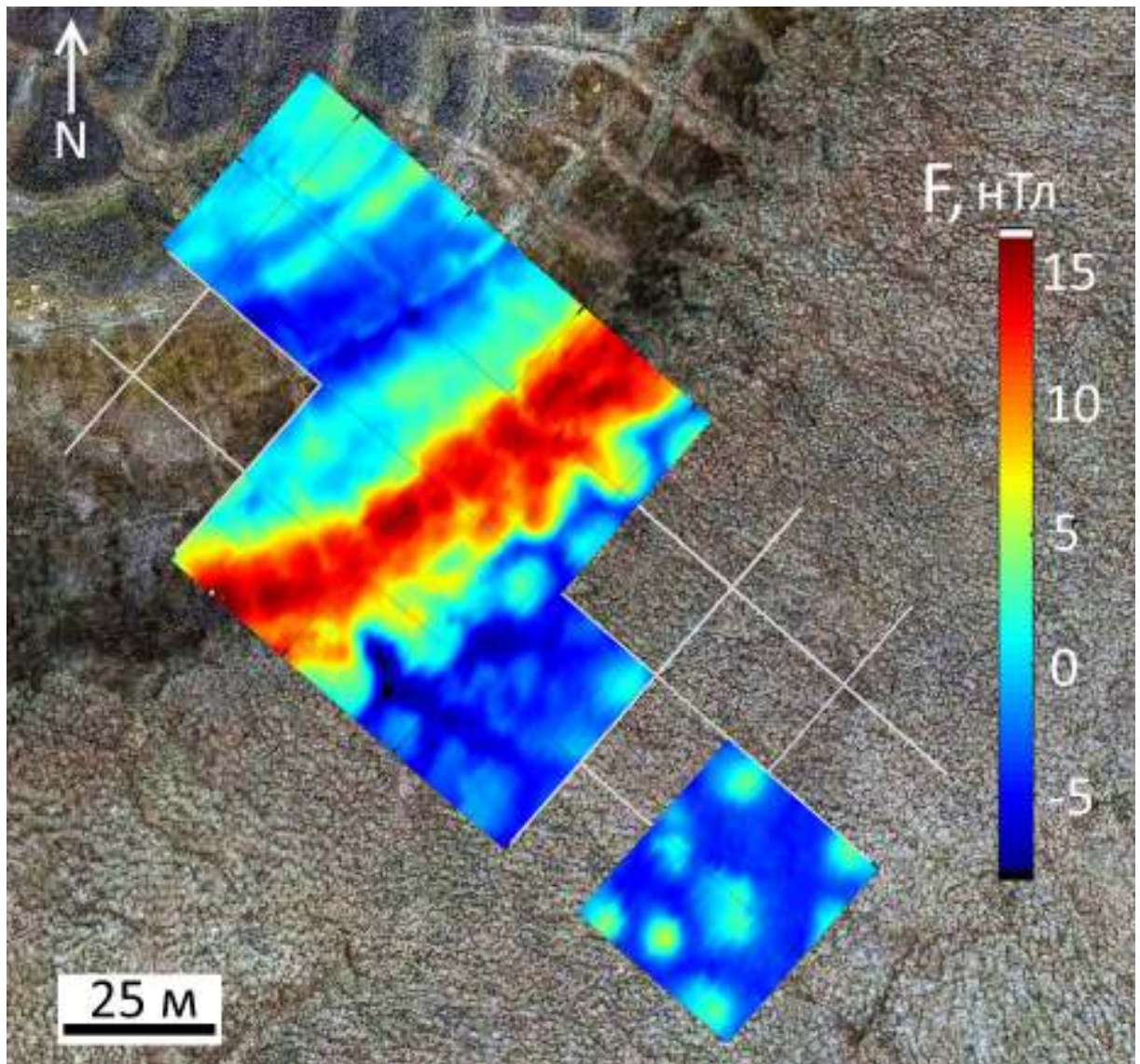


Рисунок 54 – Аномальные значения модуля вектора магнитной индукции на высоте 1.15 м над поверхностью

Как видно из рисунков 52 и 54 на качественном уровне не наблюдается связи между распределением магнитных аномалий в юго-восточной части участка и микрорельефом. Карта аномальных значений модуля вектора магнитной индукции и аэрофотоснимок были наложены для наглядности на цифровую модель рельефа (Рисунок 55).



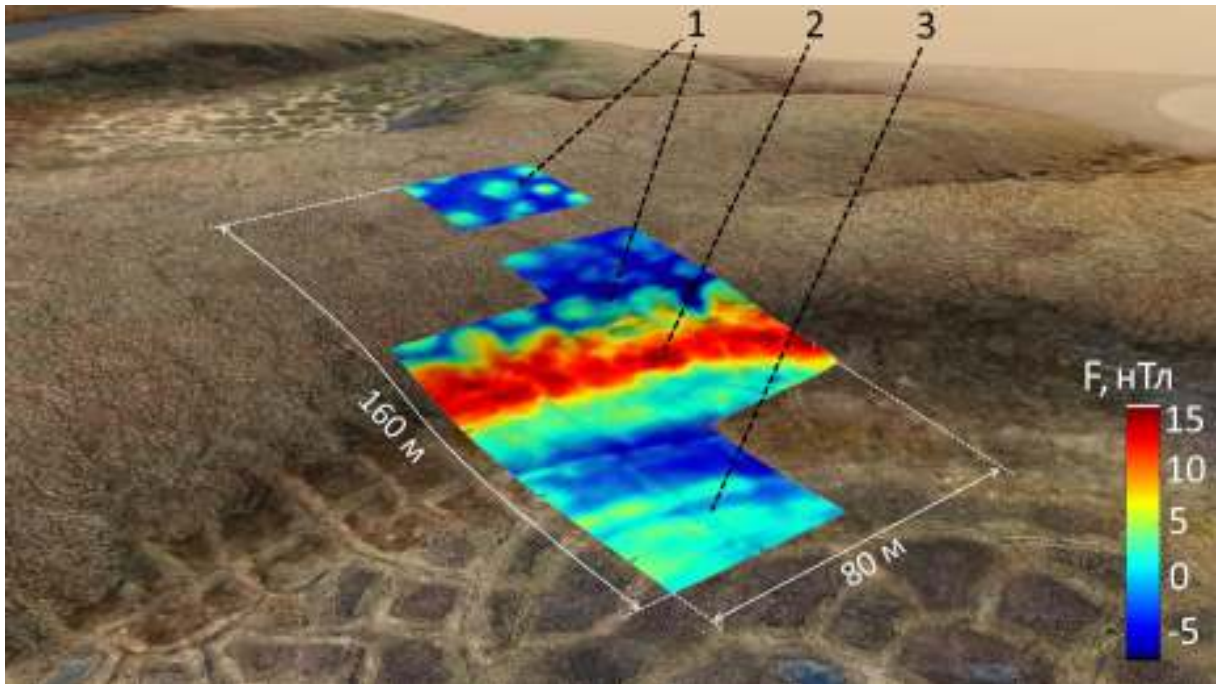


Рисунок 55 – Карта магнитных аномалий и аэрофотосъёмка, наложенные на цифровую модель рельефа: 1 – аномалии, предположительно связанные с полигонально-жильными льдами ледового комплекса; 2 – зона повышенных магнитных аномалий поперёк склона; 3 – аномалии, связанные с новообразованными ледовыми жилами на дне аласа (полигоны отчётливо видны на фотоснимке)

Анализ аномальных значений модуля вектора магнитной индукции (Рисунки 54, 55) позволяет сделать следующие выводы:

1. На склоне аласа наблюдаются магнитные аномалии, отражающие полигональную структуру отложений ледового комплекса (отметка 1 на рисунке 55). При этом на поверхности аналогичные структуры не обнаружены ни зрительно, ни в микрорельефе вследствие изменения поверхности процессом солифлюкции.

2. Внутри аласа (отметка 3 на рисунке 55) и на его склоне существенно различаются амплитуды и формы магнитных аномалий, маркирующих полигоны, что указывает на различный их генезис. Внутри аласа края полигонов ориентированы радиально, амплитуда аномалий составляет первые нТл, на склоне наблюдаются аномалии изометричной формы амплитудой более 5 нТл.

3. Поперёк склона аласа прослеживается положительная магнитная аномалия интенсивностью до 20 нТл (отметка 2 на рисунке 55). В пределах этой аномалии

отчётливо виден полигональный рисунок, размеры и форма аномалий в плане аналогичны аномалиям вне аласа, но превышают их по интенсивности.

На рисунке 56 и в таблице 1 приложения Б приведены результаты исследования образцов, отобранных на исследуемом участке.

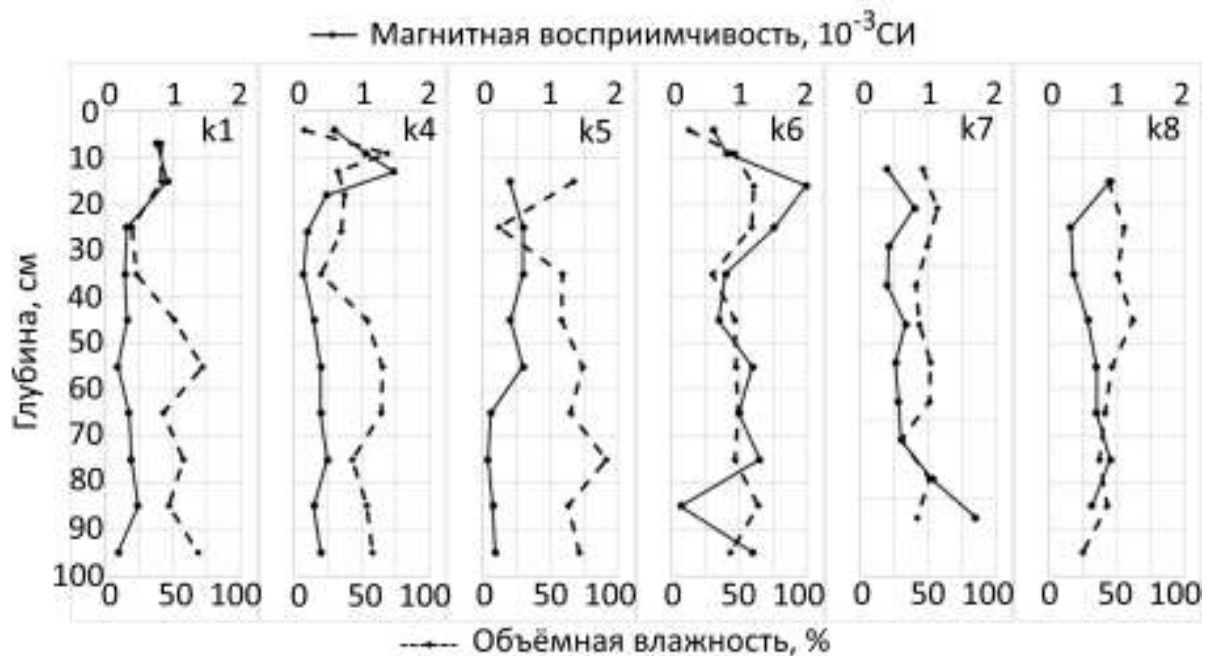


Рисунок 56 – Результаты исследования образцов многолетнемёрзлых пород на участке 3 (алас, о. Курунгнах)

Образцы отбирались с учётом карты магнитных аномалий. Точки k1, k2 и k5 были намечены в зонах отрицательных магнитных аномалий. Как можно видеть из рисунка 56 и таблицы 1 в приложении Б, в этих точках наблюдается повышенная влажность (в данном случае - высокое содержание льда) и пониженная магнитная восприимчивость. Выделяется точка k6, расположенная в зоне сильной положительной аномалии. Значение магнитной восприимчивости в образцах с этой точки повышено в пределах верхних 40 см, а ниже принимает типичные для большинства образцов значения. Следует отметить, что зона положительных аномалий наиболее сильно заносится снегом в зимний период (Рисунок 57), то есть, по-видимому, является зоной аккумуляции осадков.

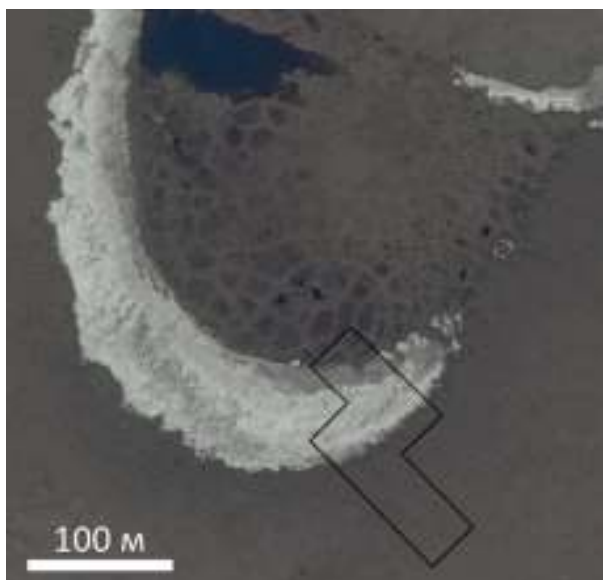


Рисунок 57 – Участок съёмки на космоснимке аласа [Картографический сервис HERE...]

Для оценки параметров возможного источника была построена квазидвумерная численная магнитная модель отложений на склоне аласа. В качестве источника положительной аномалии в среду с магнитной восприимчивостью  $0,5 \cdot 10^{-3}$  СИ была внесена полоса вещества с повышенной восприимчивостью, равной  $1,5 \cdot 10^{-3}$  СИ. Значения магнитной восприимчивости были приняты согласно измеренным значениям в зоне положительной магнитной аномалии и вне её. В процессе подбора модели варьировалось положение нижней границы этой полосы. Результат моделирования представлен на рисунке 58.

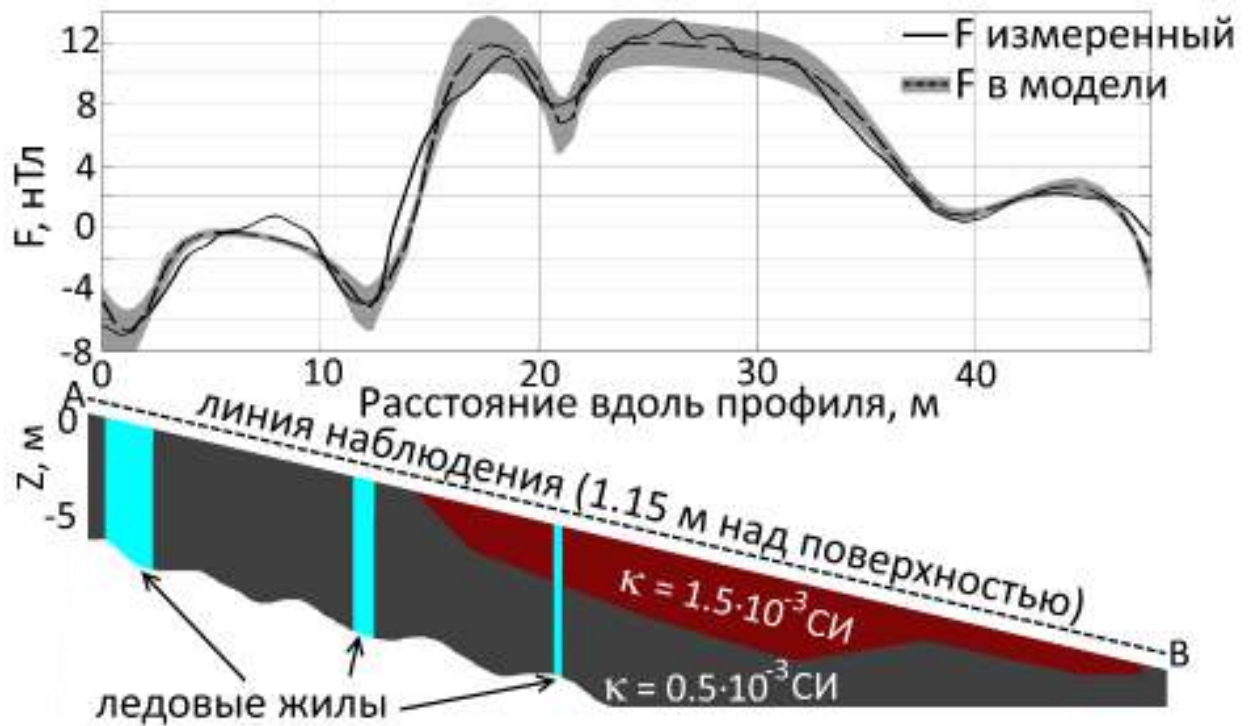


Рисунок 58 – Разрез магнитной модели и результат расчёта аномалии модуля вектора магнитной индукции на склоне аласа вдоль профиля АВ (Рисунок 50)

Результат моделирования показал, что наблюдаемая аномалия при данных значениях магнитной восприимчивости может быть создана полосой мощностью не менее 5 метров. Это противоречит данным отбора образцов в точке к6 (Рисунок 58), свидетельствующих о понижении восприимчивости до средних значений уже на глубине 0,5 м и заставляет предположить наличие зон повышенной магнитной восприимчивости на глубине ниже глубины отбора проб (ниже 1 м).

### 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-жильных льдов о. Самойловский и о. Курунгнах вследствие их различного генезиса. Несмотря на воздействие термокарстового процесса на толщину ледового комплекса на участке 3,

которое привело к образованию аласа, на его склонах отчётливо просматриваются магнитные аномалии, связанные с полигонально-жильными 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-жильных 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-жильных 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 породах, обладающих полигонально-жильной структурой. Стоит отметить некоторые закономерности, полученные в результате анализа образцов. Данные о магнитной восприимчивости и влажности образцов были подвергнуты статистическому анализу, в результате чего были получены следующие результаты. В верхнем слое наблюдается наибольшая дисперсия магнитной восприимчивости (Рисунок 59).

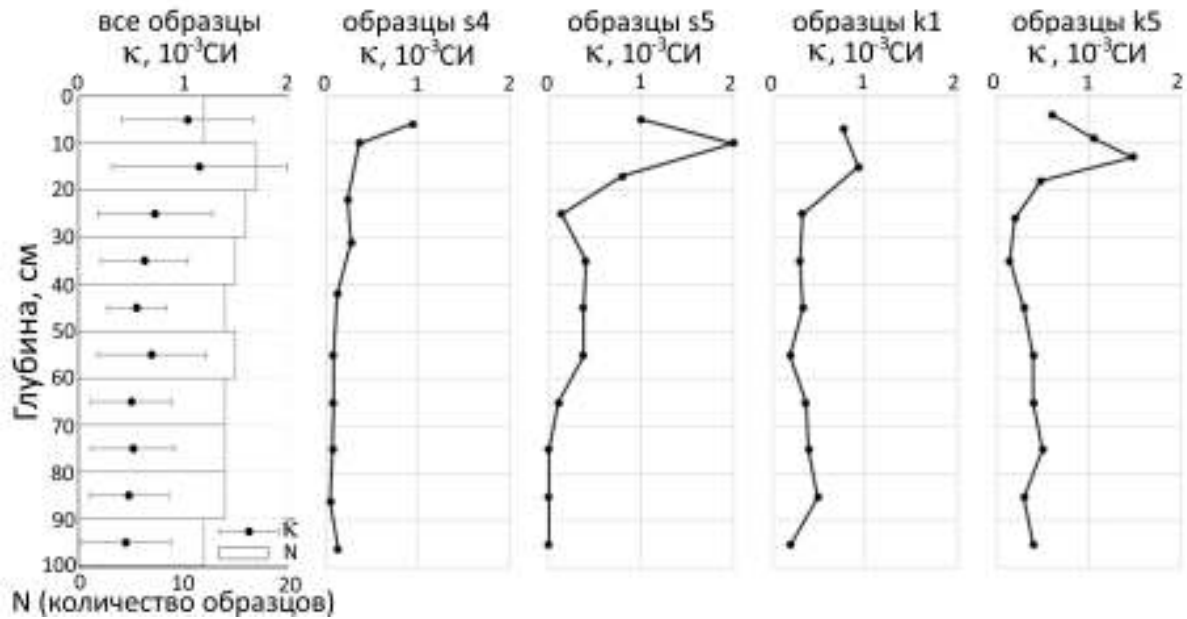


Рисунок 59 - Усреднённые значения магнитной восприимчивости в образцах по глубине для всех образцов на всех участках отбора проб (слева) и примеры разрезов магнитной восприимчивости в 4-х колонках отбора (Таблица 1 в приложении Б)

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].

Проанализирована взаимосвязь магнитной восприимчивости и влажности для всей выборки (144 образца). Уравнение линейной регрессии, построенное по методу наименьших квадратов, приняло следующий вид:

$$y = -0.011 \cdot x + 1.284 \quad (7)$$

где  $x$  - объёмная влажность в процентах,  $y$  - магнитная восприимчивость в единицах СИ, умноженная на  $10^{-3}$ . Для анализа значимости линейной связи был применён критерий Фишера [Боровков, 1984]:

$$f = R^2 / (1 - R^2) \cdot f_2 / f_1 \quad (8)$$

где  $R$  – коэффициент корреляции,  $f_1$  и  $f_2$  – число степеней свободы.

Значение F-статистики составило 27.4 при соответствующем значении F-квантили 3.91 для 95% доверительного интервала, что свидетельствует о значимости линейной зависимости. Дополнительно была проверена значимость

фактора влажности для распределения магнитной восприимчивости по критерию Стьюдента:

$$t_p = |P|/S_p \quad (9)$$

где  $P$  – параметр,  $S_p$  – случайная ошибка определения параметра. Значение  $t$ -статистики составило 5.23 при соответствующем значении  $t$ -квантили 1.98 для 95% доверительного интервала, таким образом, фактор влажности считается значимым. В графическом виде полученные результаты статистического анализа представлены на рисунке 60.

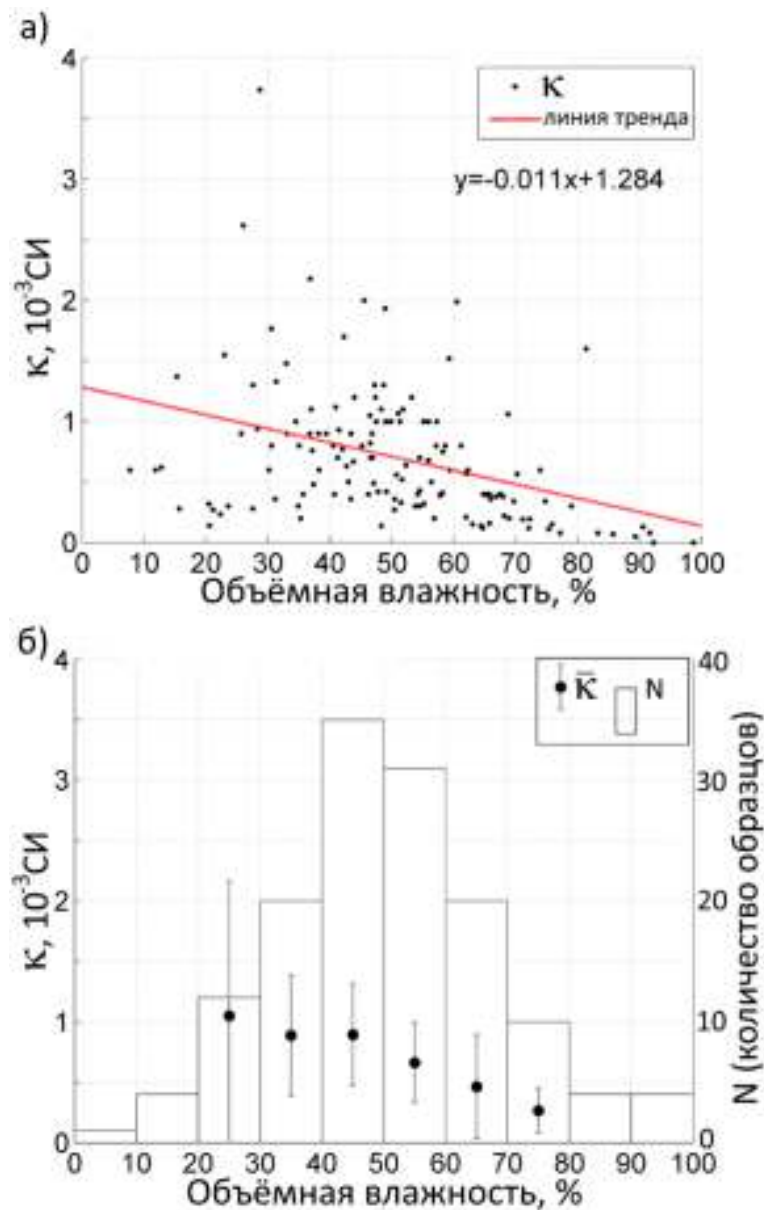


Рисунок 60 - Зависимость магнитной восприимчивости ( $\kappa$ ) от влажности (а) и средние значения  $\kappa$  в интервалах с различной влажностью (б).

Для подтверждения достоверности сравнений средних значений по выборкам, представленным на рисунке 60 б, были рассчитаны коэффициенты Фишера и приведены соответствующие выборкам квантили (таблица 4).

Таблица 4. Коэффициенты Фишера и соответствующие квантили (в скобках) для различных пар выборок

Влажность	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
20-30	5.03 [2.35]	7.11 [2.05]	11.31 [2.12]	6.85 [2.35]	36.14 [3.12]
30-40		1.41 [1.9]	2.25 [1.95]	1.36 [2.15]	7.17 [2.95]
40-50			1.59 [1.62]	1.04 [1.95]	5.08 [2.71]
50-60				0.61 [1.97]	3.2 [2.71]
60-70					5.28 [2.95]

Средняя глубина сезонно-талого слоя в районе работ за последние годы составляет 30-40 см [Baseline characteristics of climate..., 2013]. В пределах этого слоя многолетнемёрзлые породы претерпевают дополнительные ежегодные изменения минерально-органического состава [Mineral transformations in permafrost-affected..., 2003], поэтому аналогичный анализ был проведён для образцов с глубины более 40 см. Общее число таких образцов составило 84 шт. Уравнение линейной регрессии в данном случае:

$$y = -0.014 \cdot x + 1.407 \quad (10)$$

где  $x$  - объёмная влажность в процентах,  $y$  - магнитная восприимчивость в единицах СИ, умноженная на  $10^{-3}$ .

Значение F-статистики составило 41.65 при соответствующем значении F-квантили 3.96 для 95% доверительного интервала, что свидетельствует о значимости связи. Значение t-статистики составило 6.45 при соответствующем значении t-квантили 1.99 для 95% доверительного интервала. Фактор влажности, по данной оценке, считается значимым. Следует отметить, что значение



полученной регрессионной прямой в точке  $X = 100\%$  принимает значения  $0.14 \cdot 10^{-3}$  СИ для 144 и  $-0.01 \cdot 10^{-3}$  СИ для 84 наблюдений. Это соответствует физическому смыслу приведённых величин: порода со 100 % влажностью представляет собой чистый лёд, магнитная восприимчивость которого близка к 0, или, точнее, составляет  $-0.01 \cdot 10^{-3}$  СИ [Lonsdale, 1949].

### 3.4 Выводы

Результаты полевых исследований показывают, что над полигонально-жильными 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 модуля 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 [Tsibizov, 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 засолёнными многолетнемёрзлыми отложениями, таких как п-ов Ямал.

Перспективы применения метода связаны с развитием беспилотных

носителей геофизической аппаратуры. Применение метода магнитной съёмки на таком носителе может существенно повысить его скорость и расширить условия применения (становится возможной съёмка на водных объектах, над глубоким снегом).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 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.). – 2017. – С. 405-413.
2. Бабанин В. Ф. Магнитная восприимчивость мерзлотно-таежных почв Магаданской области / В. Ф. Бабанин, О. И. Худяков // Вестник МГУ, сер. Биология, почвоведение. – 1972. – №. 5. – С. 88.
3. Большиянов Д. Ю. Происхождение и развитие дельты реки Лены / Д. Ю. Большиянов и др. – СПб.: ААНИИ, 2013. – 268 с.
4. Боровков А. А. Математическая статистика / А. А. Боровков. – М.: Наука, 1984. – 472 с.
5. Бричёва С. С. Георадиолокационные исследования приповерхностных многолетнемерзлых пород на Гыданском полуострове / С. С. Бричёва, С. С. Крылов // Инженерные изыскания. – 2014. – №. 9-10. – С. 38-44.
6. Вадюнина А. Ф. Использование магнитной восприимчивости для изучения почв и их картирования / А. Ф. Вадюнина, Ю. А. Смирнов // Почвоведение. – 1978. - №7. - С. 87-95.
7. Вадюнина А. Ф. Магнитная восприимчивость некоторых почв СССР / А. Ф. Вадюнина, В. Ф. Бабанин // Почвоведение. – 1972. – №. 10. – С. 55-66.
8. Васильчук Ю. К. Повторно-жильные льды / Ю. К. Васильчук // Криосфера нефтегазокоденсатных месторождений полуострова Ямал. - Т. 2. - ООО "Газпром экспо Москва, 2013. - С. 318-325.
9. Геофизическое картирование подповерхностных геологических структур

- криолитозоны / А. В. Омеляненко, Д. В. Саввин, Н. Д. Прудецкий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – Т. 4. – №. 12.
10. Гладкий К. В. Приближенная оценка содержания жильного льда в приповерхностном слое / К. В. Гладкий, А. М. Лобанов // Обзорная информация. Разведочная геофизика. – М.: Недра, 1978. – №. 82. – С. 138-143.
11. Груздев А. А. Определение области применения бесконтактной технологии метода сопротивлений: дис. ... канд. тех. наук : 25.00.10 : защищена 19.04.2017 / Груздев Александр Игоревич. - М., 2017. - 101 с.
12. Достовалов Б.Н. Общее мерзлотоведение / Б.Н. Достовалов, В.А. Кудрявцев. - М.: изд. МГУ, 1967. - 403 с.
13. Дубиков Г. И. Повторно-жильные льды Западной Сибири / Г. И. Дубиков // Изв. АН СССР. - Сер. геогр., 1966. - №. 5. - С. 104-112.
14. 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. – 2015. – Т. 2. – С. 57-62.
15. Ершов Э. Д. Общая геокриология / Э. Д. Ершов. - М.: Изд-во МГУ, 2002. - 682 с.
16. Ершов Э. Д. Методы геокриологических исследований / Э. Д. Ершов. - М.: Изд-во МГУ, 2004. - 512 с.
17. Зонн С. В. Железо в почвах (генетические и географические аспекты) / Зонн С. В. - М.: Наука, 1982. - 208с.
18. Зыков Ю. Д. Геофизические методы исследования криолитозоны: Учебник / Ю. Д. Зыков. – М.: Изд-во МГУ, 2007. – 272 с.
19. Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная

- съемка, гидромагнитная съемка) / под ред. Ю.С. Глебовского. - М-во геологии СССР. - Л.: Недра, 1981. – 263 с.
- 20.Каплина Т. Н. Зональные закономерности распространения полигонально-жильных образований в Восточной Сибири. / Т. Н. Каплина // Палеокриология в четвертичной стратиграфии и палеогеографии. – М.: Наука, 1973, - с.38-50.
- 21.Картирование реликтовых криогенных полигональных структур с помощью геофизических методов / С. А. Ерохин и др. // Инженерные изыскания. – 2011. – №. 11. – С. 30-35.
- 22.Картографический сервис HERE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wego.here.com>.
- 23.Крылов С. С. Применение электромагнитных зондирований для исследования частотной дисперсии электрических свойств мерзлых пород / С. С. Крылов, Н. Ю. Бобров // Криосфера Земли. – 2002. – Т. 6. – №. 3. – С. 59-68.
- 24.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.
- 25.Коновалов А. А. К теории прочности мерзлого грунта / А. А. Коновалов // Криосфера Земли. – 2009. – Т. 13. – №. 1. – С. 31-39.
- 26.Коснырева М. В. Разработка комплекса геофизических методов для решения прикладных задач почвенного картирования: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / Коснырева Мария Владимировна. - М., 2007. - 101 с.
- 27.Кузнецова Т. П. О четвертичных отложениях с подземным льдом на Яно-Индигирской низменности и о. Б. Ляховском / Т. П. Кузнецова // Подземный лед. - М.: Изд-во Моск. ун-та., 1965. – С. 120.
- 28.Магнитометр MMPOS-1 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://magnetometer.ur.ru/content/view/12/9/lang,ru/>.
- 29.Матушкин Б.А. Выявление залежей льда методом высокоточной наземной



- магнитной съемки / Б. А. Матушкин // Пластовые льды криолитозоны. - Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1982. – С. 129.
30. Мельников В. П. Влияние поверхностных геологических неоднородностей на изменения гравитационного и магнитного полей / В. П. Мельников, К. В. Гладкий, А. М. Лобанов // Обзорная информация. Разведочная геофизика. – М.: Недра, 1974. – №. 64. – С. 139-144.
31. Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью сейсмических методов / В. П. Мельников и др. // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – №. 1. – С. 171-180.
32. Методика мерзлотной съемки / В. А. Кудрявцев и др. - М.: МГУ, 1979. — С. 358.
33. Мультидисциплинарные археолого-геофизические исследования в Западной Сибири / Эпов М. И. и др. // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 3. – С. 603-614.
34. Нахабцев А. С. Электропрофилирование с незаземленными рабочими линиями. / А. С. Нахабцев, Б. Г. Сапожников, А. И. Яблчанский. - Л.: Недра, 1985. – Т. 19851. – С. 96.
35. Отчёт по теме 110К-89 за 1989-1990 годы по договору № 10 от 28.02.89 со ВСЕГИНГЕО. Книга III. Тематические и опытно-методические геофизические работы / отв. исп.: А. М. Тарасов, Л. П. Харитонов, В. М. Тимофеев. - УДК 624.139.139.001.4(571.121). – п. Зеленый, 1991. – 214 с.
36. Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых / А. В. Кошурников и др. // Доклады академии наук. – М.: Наука, 2016. – Т. 469. – №. 5. – С. 616-620.
37. Попов А. И. Подземный лед / А. И. Попов // Подземный лед. Выпуск I. - М.: Изд-во МГУ, 1965. - С. 7-39.
38. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» / В. В. Оленченко и др. // Криосфера Земли. – 2015. – Т. 19. – №. 4. – С. 94-105.
39. Рекомендации по комплексированию геофизических методов при

- мерзлотной съемке / ПНИИИС. - М.: Стройиздат, 1987. - 88 с.
40. Романовский Н. Н. Формирование полигонально-жильных структур / Н. Н. Романовский. - М.: Наука, 1977. – Т. 85.
41. Руководство по определению физических теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов / ПНИИИС. - М.: Стройиздат, 1973. - 191 с.
42. Скворцов А. Г. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород / А. Г. Скворцов, М. Р. Садуртдинов, А. М. Царев // Криосфера Земли. – 2014. – Т. 18. – №. 2. – С. 83.
43. Соломатин В. И. Строение и генезис полигонально-жильного льда в плейстоценовых отложениях северной Якутии / В. И. Соломатин // Проблемы криолитологии. – 1974. – №. 4. – С. 7-99.
44. Соломатин В. И. Термокарст по полигонально-жильным льдам и формирование структур проседания / В. И. Соломатин, Р. О. Кузьмин // Проблемы криолитологии. - М.: Изд. МГУ, 1971. - Вып. II. - С. 65-71.
45. Станиловская Ю. В. Вероятностная оценка опасности полигонально-жильных льдов для трубопроводов / Ю. В. Станиловская, В. П. Мерзляков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – №. 3. – С. 48-54.
46. Томирдиаро С. В. Лессово-ледовая формация Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене / С. В. Томирдиаро. – М.: Наука, 1980. – 185 с.
47. Фаге А.Н. Электромагнитный мониторинг техногенной деградации многолетнемерзлых пород на территории полярной станции "НИС о. Самойловский" / А. Н. Фаге, Д. И. Фадеев, И. Н. Ельцов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 2. – С. 357-368.
48. Цибизов Л. В. Повторно-жильные льды в аномальном магнитном поле / Л. В. Цибизов // Проблемы Арктики и Антарктики. - 2017. - Т. 112. - С. 75-84.
49. 3D ground-penetrating radar imaging of ice complex deposits in northern East Siberia / Schennen S. et al. // Geophysics. – 2016. – Т. 81. – №. 1. – С. 195-202.
50. Advancements in the measurement of the cryosphere using geophysics -

- Introduction / A. D. Parsekian et al. // *Geophysics*. - 2016 - T. 81, - №. 1. - C. 1-2.
51. Advances in geophysical methods for permafrost investigations / C. Kneisel et al. // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2008. – T. 19. – №. 2. – C. 157-178.
52. Airborne electromagnetic and magnetic geophysical survey data of the Yukon Flats and Fort Wainwright areas, central Alaska, June 2010. / L. B. Ball et al. - US Geological Survey, 2011. – №. 2011-1304. - 21 c.
53. Airborne electromagnetic imaging of discontinuous permafrost / B. J. Minsley et al. // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – T. 39. – №. 2. - 8 c.
54. Allred B. J. Handbook of agricultural geophysics / B. J. Allred, J. J. Daniels, M. Reza Ehsani. - CRC Press, 2008. - 432 c.
55. Andersland O. B. An Introduction to Frozen Ground Engineering, 2nd edn. / O. B. Andersland, B. Ladanyi. - Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. - 363 c.
56. Application of ground-penetrating radar imagery for three-dimensional visualisation of near-surface structures in ice-rich permafrost, Barrow, Alaska / J. S. Munroe et al. // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2007. – T. 18. – №. 4. – C. 309-321.
57. Arcone S. A. Radar detection of ice wedges in Alaska / S. A. Arcone, P. V. Sellmann, A. J. Delaney // *CRREL Report 82-43*. – Hanover: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1982. – 17 c.
58. Banville D. R. Objective interpretation of induced polarization tomography using a quantitative approach for the investigation of periglacial environments / D. R. Banville, R. Fortier, C. Dupuis // *Journal of Applied Geophysics*. – 2016. – T. 130. – C. 218-233.
59. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998-2011) / J. Boike et al. // *Biogeosciences (BG)*. – 2013. – T. 10. – №. 3. – C. 2105-2128.
60. Becker H. Magnetic Prospecting in Archaeological Sites / H. Becker, J. W. E. Fassbinder // *Monuments and Sites VI*. - ICOMOS, 2001. - 104 c.
61. Bolshiyarov D. Lena River delta formation during the Holocene / D. Bolshiyarov,

- A. Makarov, L. Savelieva // *Biogeosciences*. – 2015. – T. 12. – №. 2. – C. 579-593.
62. Butler S. L. Forward modeling of applied geophysics methods using Comsol and comparison with analytical and laboratory analog models / S. L. Butler, G. Sinha // *Computers & Geosciences*. – 2012. – T. 42. – C. 168-176.
63. Combined Geophysical Approach in a Complex Arctic Archaeological Environment: A Case Study from the LdFa-1 Site, Southern Baffin Island, Nunavut / D. B. Landry et al. // *Archaeological Prospection*. – 2015. – T. 22. – №. 3. – C. 157-170.
64. Comparison of geophysical investigations for detection of massive ground ice (pingo ice) / K. Yoshikawa et al. // *Journal of Geophysical Research: Planets*. – 2006. – T. 111. – №. E6.
65. De Pascale G. P. Geophysical mapping of ground ice using a combination of capacitive coupled resistivity and ground-penetrating radar, Northwest Territories, Canada / G. P. De Pascale, W. H. Pollard, K. K. Williams // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. – 2008. – T. 113. – №. F2.
66. Degrading permafrost mapped with electrical resistivity tomography, airborne imagery and LiDAR, and seasonal thaw measurements / T. A. Douglas et al. // *Geophysics*. – 2015. – T. 81. – №. 1. – C. 71-85.
67. Detection of subsurface permafrost features with ground-penetrating radar, Barrow, Alaska / K. M. Hinkel et al. // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2001. – T. 12. – №. 2. – C. 179-190.
68. Direct current (DC) resistivity and induced polarization (IP) monitoring of active layer dynamics at high temporal resolution / J. Doetsch et al. // *Cold Regions Science and Technology*. – 2015. – T. 119. – C. 16-28.
69. Ermolin E. Mapping of permafrost on Vega Island, Antarctic Peninsula, using satellite images and aerial photography / E. Ermolin, H. De Angelis, P. Skvarca // *Annals of Glaciology*. – 2002. – T. 34. – №. 1. – C. 184-188.
70. Fortier D. Observation of rapid drainage system development by thermal erosion of ice wedges on Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago / D. Fortier, M. Allard, Y. Shur // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2007. – T. 18. – №. 3. – C. 229-

- 243.
71. Fundamentals of the capacitive resistivity technique / O. Kuras et al. // *Geophysics*. – 2006. – Т. 71. – №. 3. – С. 135-152.
72. GEM GSMP Potassium Magnetometer for High Precision and Accuracy [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.gemsys.ca/wp-content/uploads/2012/10/GSMP-35-Ground.pdf?lbisphreq=1>.
73. Geophysical and cryostratigraphic investigations for road design in northern Alaska / E. D. Trochim et al. // *Cold Regions Science and Technology*. – 2016. – Т. 131. – С. 24-38.
74. Geophysical estimation of shallow permafrost distribution and properties in an ice-wedge polygon-dominated Arctic tundra region / B. Dafflon et al. // *Geophysics*. – 2016 - Т. 81. - №. 1. - С. 247-263.
75. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost / Y. Sjöberg et al. // *The Cryosphere*. – 2015. – Т. 9. – №. 2. – С. 465-478.
76. Geophysical surveys, permafrost conditions and infrastructure damage along the northern Yukon Alaska Highway / G. A. Oldenborger et al. // *Geological Survey of Canada, Open File*. – 2015. – Т. 7875. - 59 с.
77. Gilbert G. L. Recent advances (2008–2015) in the study of ground ice and cryostratigraphy / G. L. Gilbert, M. Kanevskiy, J. B. Murton // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2016. – Т. 27. – №. 4. – С. 377-389.
78. Hallet B. Measurement of soil motion in sorted circles, western Spitsbergen / B. Hallet, M. Allard // *Permafrost: Seventh International Conference, Proceedings: Centre d'Etudes Nordiques de Université Laval, Collection Nordicana*. – 1998. – №. 57. – С. 415-420.
79. Hauck C. Applied geophysics in periglacial environments / C. Hauck, C. Kneisel. - New York: Cambridge University Press, 2008. - Т. 240. - 256 с.
80. Hauck C. New concepts in geophysical surveying and data interpretation for permafrost terrain / C. Hauck // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2013. – Т. 24. – №. 2. – С. 131-137.
81. Hodgetts L. Archaeological magnetometry in an Arctic setting: a case study from

- Maguse Lake, Nunavut / L. Hodgetts, P. Dawson, E. Eastaugh // *Journal of Archaeological Science*. – 2011. – T. 38. – №. 7. – C. 1754-1762.
82. Hoekstra P. Ground and airborne resistivity surveys of permafrost near Fairbanks, Alaska / P. Hoekstra, P. V. Sellmann, A. Delaney // *Geophysics*. – 1975. – T. 40. – №. 4. – C. 641-656.
83. Improved Understanding of Permafrost Controls on Hydrology in Interior Alaska by Integration of Ground-Based Geophysical Permafrost Characterization and Numerical Modeling / M. A. Walvoord et al. – Engineer research and development center Fort Richardson, Cold regions research and engineering lab, 2015. – 111 c.
84. 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. - T. 709. - C. 56-69.
85. Internal structure and conditions of permafrost mounds at Umiujaq in Nunavik, Canada, inferred from field investigation and electrical resistivity tomography / R. Fortier et al. // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 2008. – T. 45. – №. 3. – C. 367-387.
86. KAPPAMETER model KT-5 USER'S MANUAL. – Geofyzika Brno Czechoslovakia, 1980. – 24 c.
87. Kneisel C. Application of 3D electrical resistivity imaging for mapping frozen ground conditions exemplified by three case studies / C. Kneisel, A. Emmert, J. Kastl // *Geomorphology*. – 2014. – T. 210. – C. 71-82.
88. Korhonen K. Frequency Domain Electromagnetic Soundings of Canadian Deep Permafrost / K. Korhonen, T. Ruskeenieni, M. P. J. Lehtimäki // *Geophysica*. – 2009. – T. 45. – №. 1-2. – C. 77-92.
89. Kuzmina S. Paleoecological and sedimentological studies of Permafrost deposits in the Central Lena Delta (Kurungnakh and Samoylov Islands) / S. Kuzmina, S. Wetterich, H. Meyer // *Russian Polar Research*. – AWI, Alfred-Wegener-Institut für Polar-und Meeresforschung, 2003. – C. 71-81.

90. Kvamme K. L. Magnetometry: Nature's gift to archaeology / K. L. Kvamme // Remote sensing in archaeology: An explicitly North American perspective. – 2006. – C. 205-233.
91. Lonsdale K. Diamagnetic susceptibility and anisotropy of ice / K. Lonsdale // Nature. – 1949. – T. 164. – C. 101.
92. Løvlie R. Dating of thaw depths in permafrost terrain by the palaeomagnetic method: experimental acquisition of a freezing remanent magnetization / R. Løvlie, J. Putkonen // Geophysical Journal International. – 1996. – T. 125. – №. 3. – C. 850-856.
93. 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. C. 73-74.
94. 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. C. 969.
95. Magnetic susceptibility application: a window onto ancient environments and climatic variations: foreword / A. C. Da Silva et al. // Geological Society, London, Special Publications. – 2015. – T. 414. – №. 1. – C. 1-13.
96. Massive Ice and Ice-Rich Soil Detection by Gravimetric Surveying at Dry Creek, Southwestern Yukon Territory, Canada / Jr. B. Loranger et al. // Cold Regions Engineering, 2015. – C. 46-56.
97. Mineral transformations in permafrost-affected soils, North Kolyma Lowland, Russia / A. Alekseev et al. // Soil Science Society of America Journal. – 2003. – T. 67. – №. 2. – C. 596-605.
98. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, northeast Siberia, Russia / S. Wetterich et al. // Quaternary Science Reviews. – 2008. – T. 27. – №. 15. – C. 1523-1540.
99. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology / A. K. Liljedahl et al. // Nature Geoscience. – 2016. – T. 9. – №. 4. – C. 312-318.



100. PANGAEA. Data Publisher for Earth & Environmental Science [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://pangaea.de/>.
101. Patterns and rates of riverbank erosion involving ice-rich permafrost (yedoma) in northern Alaska / M. Kanevskiy et al. // *Geomorphology*. – 2016. – Т. 253. – С. 370-384.
102. Periglacial sediment variations controlled by late Quaternary climate and lake level change at Elgygytgyn Crater, Arctic Siberia / G. Schwamborn et al. // *Boreas*. – 2008. – Т. 37. – №. 1. – С. 55-65.
103. Permafrost Active Layer Seismic Interferometry Experiment (PALSIE) and Satellite Observations / H. Knox et al. – Sandia National Laboratories, Albuquerque, United States, 2015. – №. SAND2015-9097C. - 16 с.
104. Prospecting frost-wedge pseudomorphs and their polygonal network using the electromagnetic induction sensor EM38DD / L. Cockx et al. // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2006. – Т. 17. – №. 2. – С. 163-168.
105. Quantifying and relating land-surface and subsurface variability in permafrost environments using LiDAR and surface geophysical datasets / S. S. Hubbard et al. // *Hydrogeology Journal*. – 2013. – Т. 21. – №. 1. – С. 149-169.
106. Remote sensing of glacier and permafrost-related hazards in high mountains: an overview / A. Kääh et al. // *Natural Hazards and Earth System Science*. – 2005. – Т. 5. – №. 4. – С. 527-554.
107. Remote sensing of permafrost and frozen ground / S. Westermann et al. // *Remote Sensing of the Cryosphere*. – 2015. – С. 307-344.
108. Resistivity structures in alas areas in Central Yakutia, Siberia, and the interpretation of permafrost history / K. Harada et al. // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2006. – Т. 17. – №. 2. – С. 105-118.
109. Schneider J. Land cover classification of tundra environments in the Arctic Lena Delta based on Landsat 7 ETM+ data and its application for upscaling of methane emissions / J. Schneider, G. Grosse, D. Wagner // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – Т. 113. – №. 2. – С. 380-391.
110. Scott W. J. Geophysics in the study of permafrost / W. J. Scott, P. Sellmann,

- J. A. Hunter // Geotechnical and environmental geophysics. – 1990. – T. 1. – C. 355-384.
111. Seismic cone penetration test and seismic tomography in permafrost / A. M. LeBlanc et al. // Canadian geotechnical journal. – 2004. – T. 41. – №. 5. – C. 796-813.
112. Storage and transformation of organic matter fractions in cryoturbated permafrost soils across the Siberian Arctic / Gentsch N. et al. // Biogeosciences. - T. 12. - 2015. - C. 4525-4542.
113. Tsibizov L. Magnetic imaging of the Kurungnakh Island ice complex upper layer structure, Lena Delta, Russia / L. Tsibizov, O. Rusalimova // Near Surface Geophysics. – 2017. – T. 15. – №. 5. – C. 527-532.
114. Wang Y. Paleomagnetism of Canadian Arctic permafrost: Quaternary magnetostratigraphy of the Mackenzie Delta / Y. Wang, M. E. Evans // Canadian Journal of Earth Sciences. – 1997. – T. 34. – №. 2. – C. 135-139.
115. Washburn A. L. Geocryology - A Survey of Periglacial Processes and Environments / A. L. Washburn. - London, UK: Edward Arnold Ltd., 1979. – 406 c.
116. Watanabe T. Mudboil and ice-wedge dynamics investigated by electrical resistivity tomography, ground temperatures and surface movements in Svalbard / T. Watanabe, N. Matsuoka, H. H. Christiansen // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. – 2012. – T. 94. – №. 4. – C. 445-457.
117. Wildlife response to environmental Arctic change: Predicting future habitats of Arctic Alaska / P. D. Martin et al. // Report of the Wildlife Response to Environmental Arctic Change (WildREACH): Predicting Future Habitats of Arctic Alaska Workshop. – 2008. – C. 17-18.
118. Wolff C. B. Geophysical analysis at the Old Whaling site, Cape Krusenstern, Alaska, reveals the possible impact of permafrost loss on archaeological interpretation / C. B. Wolff, T. M. Urban // Polar Research. – 2013. – T. 32. – №. 1. – C. 1-12.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Приложение А

## Магнитные вариации в период полевых наблюдений

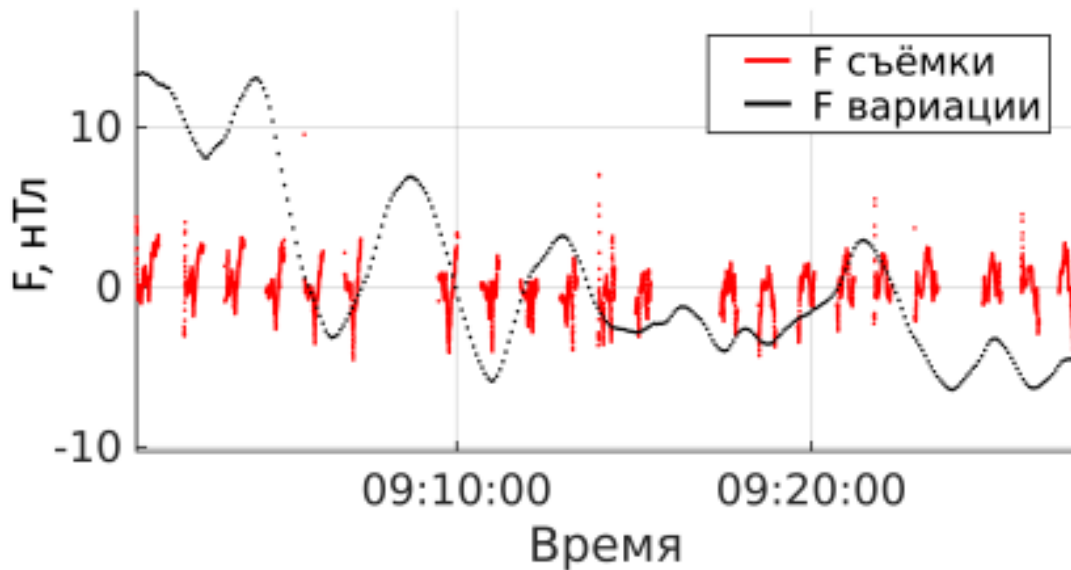


Рисунок 1 – Запись значений модуля вектора магнитной индукции на вариационной станции (чёрным) и на профилях (красным) 2016.07.13 (участок 1, о. Самойловский); из каждого ряда данных вычтено среднее значение

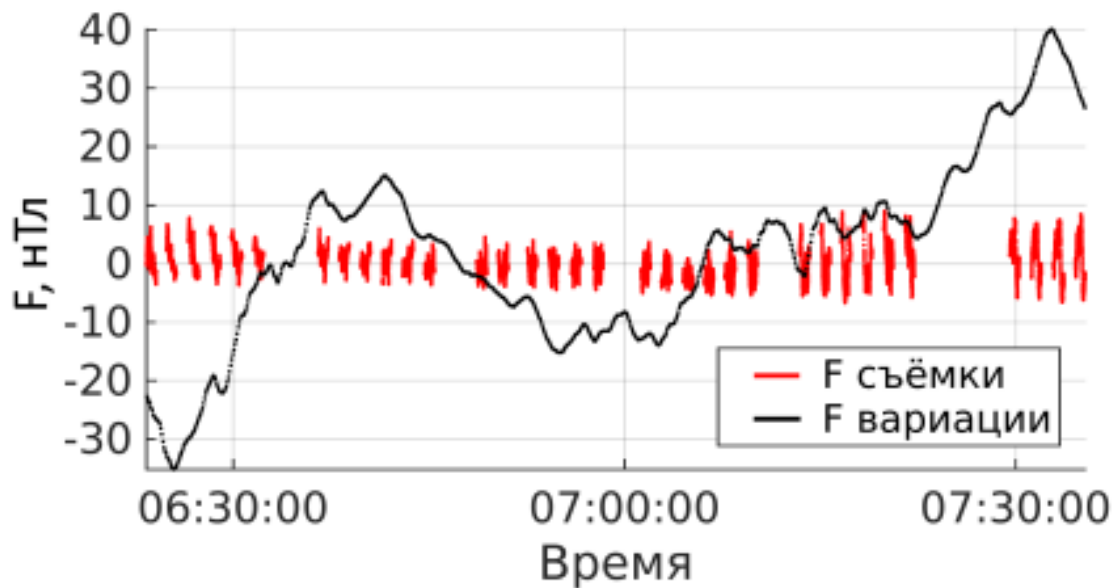


Рисунок 2 – Запись значений модуля вектора магнитной индукции на вариационной станции (чёрным) и на профилях (красным) 2016.07.15 (участок 3, алас, о. Курунгнах); из каждого ряда данных вычтено среднее значение

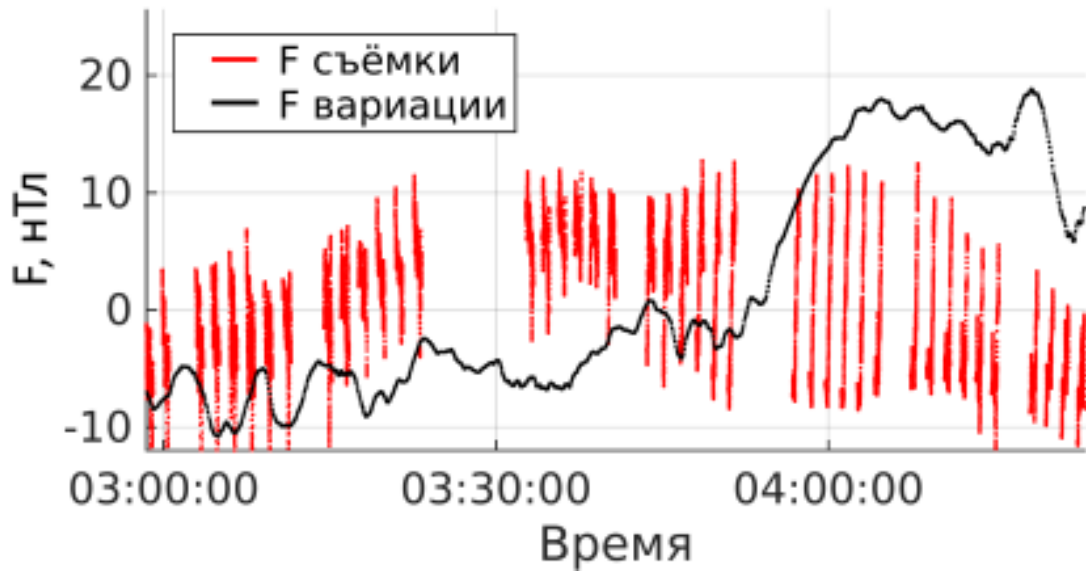


Рисунок 3 – Запись значений модуля вектора магнитной индукции на вариационной станции (чёрным) и на профилях (красным) 2016.07.15 (участок 3, алас, о. Курунгнах); из каждого ряда данных вычтено среднее значение

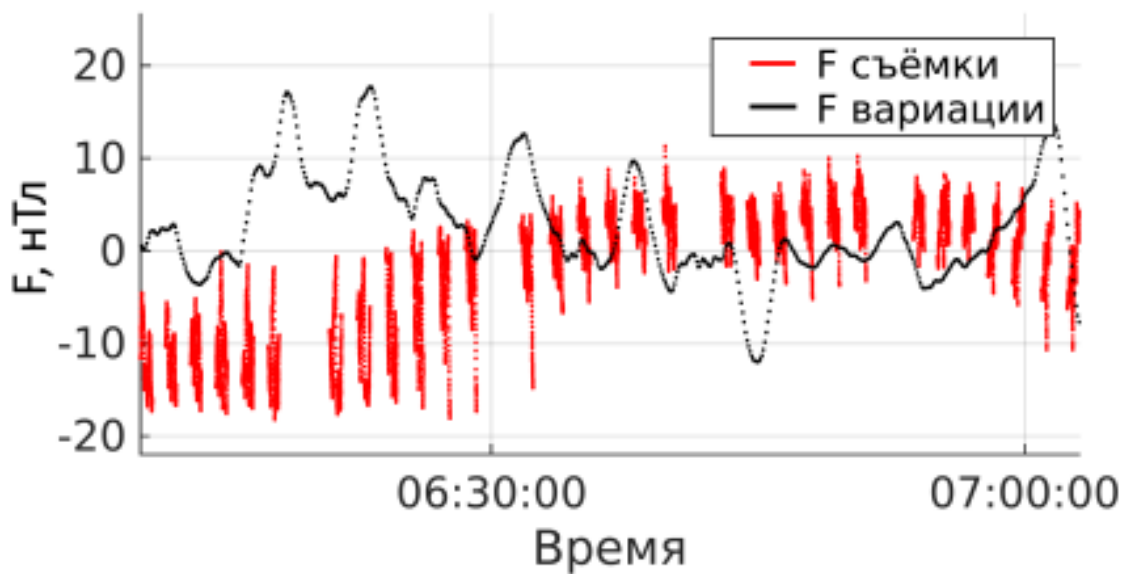


Рисунок 4 – Запись значений модуля вектора магнитной индукции на вариационной станции (чёрным) и на профилях (красным) 2016.07.16 (участок 3, алас, о. Курунгнах); из каждого ряда данных вычтено среднее значение

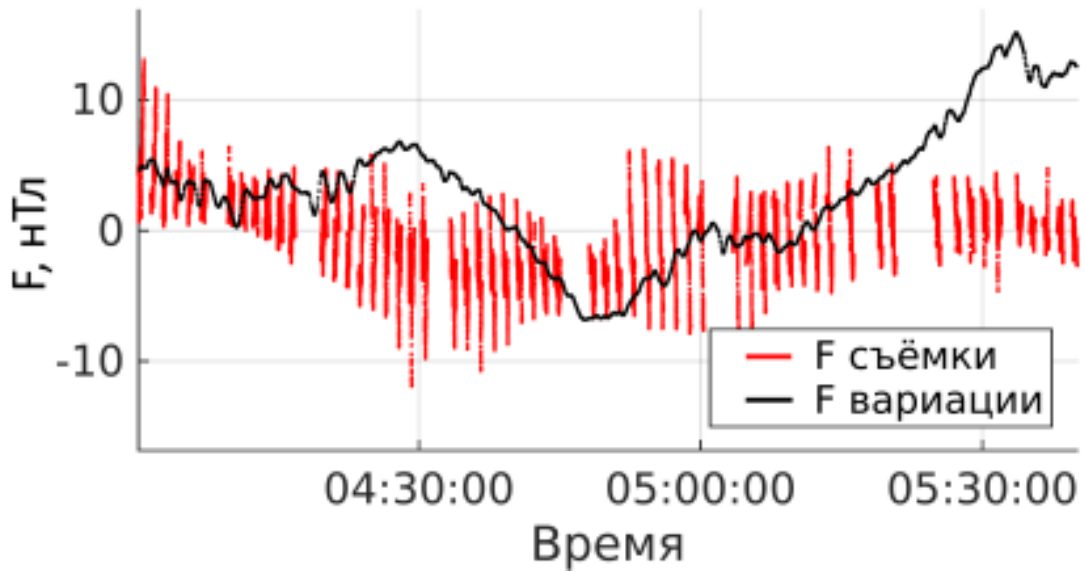


Рисунок 5 – Запись значений модуля вектора магнитной индукции на вариационной станции (чёрным) и на профилях (красным) 2016.07.16 (участок 3, алас, о. Курунгнах); из каждого ряда данных вычтено среднее значение

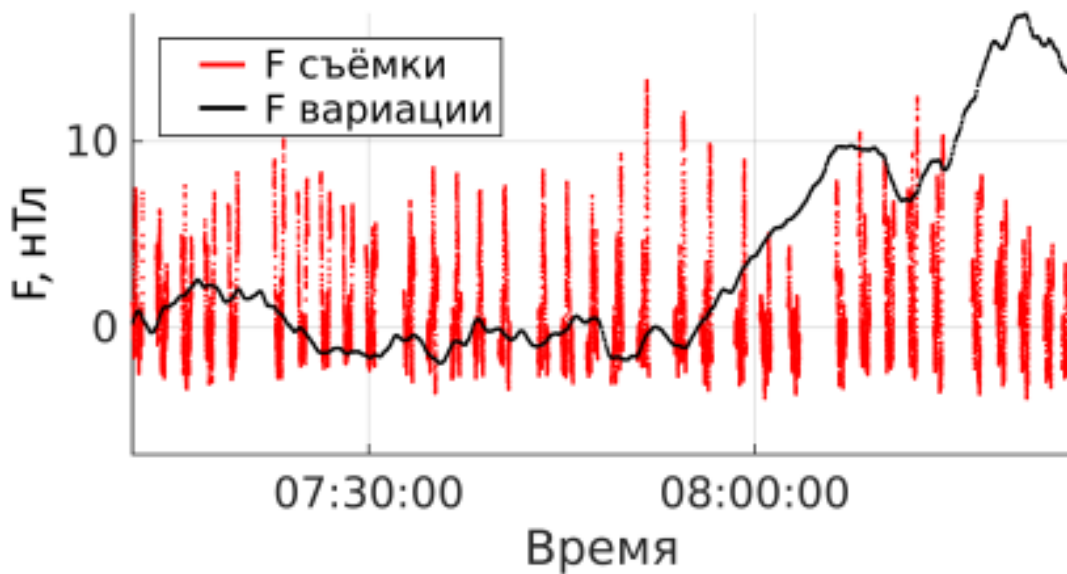


Рисунок 6 – Запись значений модуля вектора магнитной индукции на вариационной станции (чёрным) и на профилях (красным) 2016.07.18 (участок 3, алас, о. Курунгнах); из каждого ряда данных вычтено среднее значение

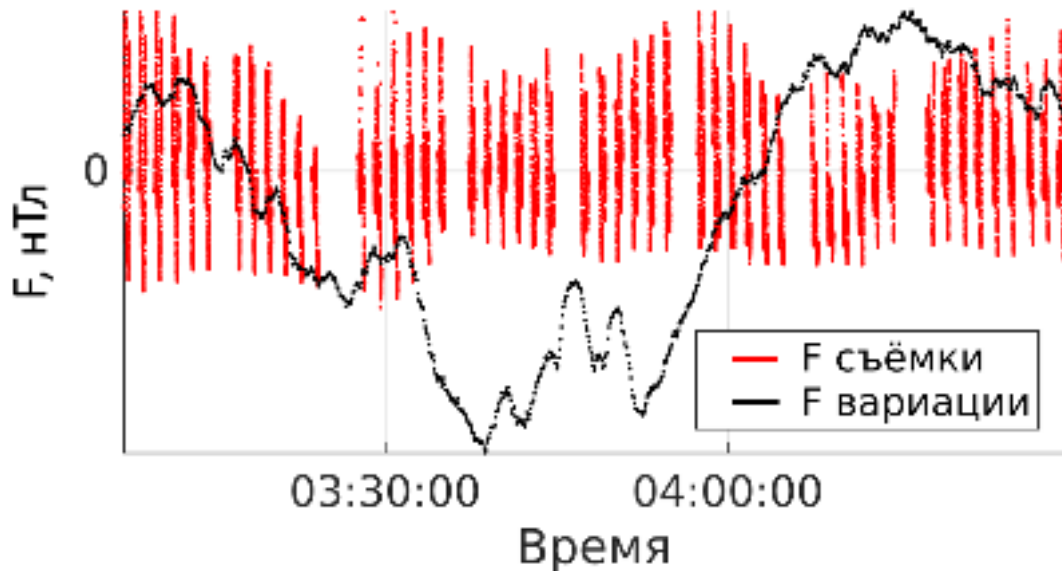


Рисунок 7 – Запись значений модуля вектора магнитной индукции на вариационной станции (чёрным) и на профилях (красным) 2016.07.21 (участок 2, ледовый комплекс, о. Курунгнах); из каждого ряда данных вычтено среднее значение

## Приложение Б

## Результаты исследования образцов многолетнемёрзлых пород

Таблица 1 – Данные исследования образцов многолетнемёрзлых пород (в наименовании

"s..." – о. Самойловский, "к..." – о. Курунгнах), К – магнитная восприимчивость

индекс образца; мощность активного слоя	Координаты	Глубина, см	К (мёрзлый), 10 <sup>-3</sup> СИ (± 10 <sup>-5</sup> СИ)	К (сухой), 10 <sup>-3</sup> СИ (± 10 <sup>-5</sup> СИ)	Объёмная влажность, % (± 10 %)
s1 12	N 72,37605 E 126,47936	9	0,60	0,50	-
		12	0,60	0,46	-
		17	0,80	0,67	59
		25	1,00	0,63	55
		35	1,30	1,08	49
		45	1,00	0,81	51
		55	1,93	1,45	49
		65	1,20	0,75	53
		75	1,00	0,76	56
		85	1,00	0,89	50
		95	-	0,82	57
s2 42	N 72,37603 E 126,47867	4	1,77	0,77	31
		8	2,62	1,28	26
		18	3,74	1,37	29
		26	2,18	1,16	37
		35	1,55	0,52	23
		55	-	1,27	22
		75	-	1,33	36
		90	-	0,88	52
s3 40	N 72,36703 E 126,48639	3	1,37	0,49	15
		12	1,30	0,41	28
		21	0,76	0,49	37
		29	0,28	0,10	28
		37	-	0,05	-
		45	0,60	0,25	38
		52	0,60	0,35	62
		62	0,43	0,34	54
		75	0,34	0,43	70
		85	0,36	0,36	66
		95	0,34	0,31	75
s4 35	N 72,36681 E 126,48886	6	0,94	0,48	28
		10	0,36	0,11	31
		22	0,23	0,06	22
		31	0,27	0,08	21



		42	0,12	0,12	72
		55	0,08	0,09	77
		65	0,08	0,09	83
		75	0,07	0,07	86
		86	0,05	0,09	89
		96	0,13	0,07	91
s5 21	N 72,37222 E 126,48608	5	1,00	0,52	34
		10	2,00	0,69	46
		17	0,80	0,34	61
		25	0,14	0,12	48
		35	0,40	0,21	54
		45	0,38	0,27	67
		55	0,38	0,40	68
		65	0,11	-	104
		75	0,00	-	92
		85	0,00	-	99
		95	0,00	-	110
s6 30	N 72,37222 E 126,48608	37	0,22	0,21	68
		52	1,60	0,19	81
		68	-	0,13	78
		81	-	0,07	78
		94	-	0,44	59
s7 20	N 72,37604 E 126,47934	5	-	0,25	-
		11	-	0,42	-
		16	-	0,71	47
		25	0,90	0,76	33
		35	1,00	0,81	56
		45	0,75	0,74	58
		55	0,30	0,70	79
		65	0,11	0,53	75
		75	0,50	0,75	56
		85	0,57	0,82	70
		95	0,02	-	104
s8 12	N 72,37603 E 126,47914	16	0,80	0,86	45
		25	1,10	0,97	37
		35	0,80	0,72	40
		45	1,00	0,85	47
		55	0,64	0,57	52
		65	0,90	0,71	38
		75	0,40	0,42	66
		85	1,10	0,85	48
		95	0,70	0,67	54
s9 12	N 72,37601 E 126,47898	11	-	0,77	-
		16	0,80	0,75	35
		25	0,90	1,01	26
		35	0,90	0,95	43

		45	0,90	0,81	39
		55	0,90	0,71	47
		65	1,00	0,90	57
		75	1,05	0,79	46
		85	1,10	0,91	52
		95	1,00	0,80	49
k1	N 72,28917	7	0,77	0,67	42
20	E 126,18683	15	0,93	0,42	41
		25	0,32	0,21	20
		35	0,30	0,23	24
		45	0,33	0,31	51
		55	0,19	0,21	72
		65	0,36	0,38	43
		75	0,39	0,56	58
		85	0,49	0,67	47
		95	0,20	0,35	69
k2	N 72,28922	4	0,28	0,69	16
12	E 126,18607	10	1,12	0,83	41
k3	N 72,28939	4	0,68	0,58	56
17	E 126,18602	13	1,33	0,61	31
k4	N 72,28947	5	0,60	-	8
22	E 126,18717	9	1,06	0,52	69
		13	1,48	0,91	33
		18	0,48	0,45	37
		26	0,20	0,31	35
		35	0,14	0,23	21
		45	0,30	0,31	54
		55	0,40	0,35	65
		65	0,40	0,42	65
		75	0,50	0,57	43
		85	0,30	0,37	54
		95	0,40	0,34	58
k5	N 72,28951	15	0,40	0,32	67
10	E 126,18735	25	0,60	0,83	12
		35	0,60	0,68	59
		45	0,41	0,65	58
		55	0,60	0,57	74
		65	0,12	0,19	65
		75	0,08	0,13	92
		85	0,15	0,22	63
		95	0,19	0,25	71
k6	N 72,28967	4	0,62	0,44	13
40	E 126,18669	9	0,82	0,45	47
		16	1,99	0,94	60
		25	1,52	0,78	59
		35	0,80	0,83	31

		45	0,70	0,90	47
		55	1,20	1,22	47
		65	1,00	1,17	49
		75	1,30	1,28	47
		85	0,14	1,30	64
		95	1,20	1,08	44
k7	N 72,28981	15	0,40	0,92	46
		25	0,80	0,50	57
		35	0,42	0,46	49
		45	0,40	0,57	41
10	E 126,18669	55	0,67	0,46	44
		65	0,52	0,40	52
		75	0,56	0,39	51
		85	0,60	0,73	30
		95	1,07	1,06	51
		105	1,70		42
k8	N 72,28989	15	0,90	0,73	43
		25	0,32	0,27	55
		35	0,36	0,28	50
		45	0,57	0,47	62
10	E 126,18658	55	0,70	0,57	47
		65	0,70	0,49	41
		75	0,90	0,55	37
		85	0,63	0,36	43
		95		0,66	24
k9	N 72,2913	18		0,60	31
		25	0,42	0,44	48
		35	0,40	0,31	36
		45	0,30	0,30	35
18	E 126,18639	55	0,27	0,31	50
		65	0,16	0,40	66
		75	0,21	0,31	62
		85	0,20	0,34	57
		95	0,15	0,26	76