

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Ордена Трудового Красного Знамени  
Институт солнечно-земной физики  
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

УДК 550.385



Марчук Роман Александрович

**Динамика электромагнитных УНЧ-колебаний и ионосферных токов  
в ходе атмосферных и космических возмущений**

Специальность 1.3.1 «Физика космоса, астрономия»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:**

**Мишин Владимир Виленович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

**Официальные оппоненты:**

**Паперный Виктор Львович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», заведующий кафедрой общей и космической физики

**Дмитриев Алексей Владимирович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына», старший научный сотрудник

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», «Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск.

Защита диссертации состоится «18» июня 2026 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.197.01, созданного при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291).

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://iszf.irk.ru> и в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



Ю.В. Ясюкевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Изучение космической погоды остается одной из ключевых задач современной солнечно-земной физики, поскольку магнитосферные бури, суббури и другие геомагнитные возмущения оказывают значительное влияние на технологические системы и инфраструктуру. Эти явления возникают при воздействии возмущенного солнечного ветра (СВ) на магнитосферу Земли после солнечных вспышек и корональных выбросов массы. В результате в системе магнитосфера–ионосфера–атмосфера формируются сложные возмущения геомагнитного поля и плазмы, способные вызывать значительные помехи и неисправности в технических системах. Особый интерес при этом представляет динамика границ аврорального овала, где высыпания электронов вызывают полярные сияния, а также усиление ионосферных (поперечных) и продольных токов (ПТ). Наблюдения последних лет выявили тенденцию смещения аврорального овала в ходе интенсивных геомагнитных возмущений в Восточном полушарии на более низкие широты, чем это считалось ранее, вплоть до средних широт (в том числе до широт станций ИСЗФ СО РАН, данные которых анализируются в диссертационной работе), в результате ускоренного смещения геомагнитного полюса из Канады к полуострову Таймыр [Logachev, Stozhkov, 2022; Srivastava et al., 2025].

Актуальным направлением является также разработка методов таймирования начала активной фазы суббурь и других типов геомагнитных возмущений. Традиционные подходы, основанные на анализе длиннопериодных геомагнитных пульсаций типа  $Pi2/Pi3$ , обладают ограниченным временным разрешением, что затрудняет исследование быстрых процессов. Регистрация геомагнитных пульсаций современными индукционными магнитометрами с частотой опроса более 10 Гц открывает новые возможности для детального анализа короткопериодных пульсаций, сопровождающих взрывную фазу суббури. Совместный анализ этих данных и временных рядов карт распределения ПТ — выходного продукта техники инверсии магнитограмм (ТИМ), разработанной в ИСЗФ СО РАН, — позволит

уточнить временную структуру развития суббурь, что важно для понимания их механизмов и прогнозирования космической погоды.

Кроме того, геомагнитные пульсации широко используются для исследования системы «атмосфера—ионосфера» и волновой диагностики возникающих в холодной плазме высокоатмосферных электрических разрядов, способных влиять на локальную электродинамику и химический состав верхней атмосферы. Современные магнитометры, имеющие достаточно высокую частоту дискретизации и чувствительность датчиков, позволяют изучать радиоволны в слабоизученном, но перспективном для геофизических исследований диапазоне крайне низких частот, в котором фиксируются сигналы атмосферных разрядов. Также актуальными остаются проблемы космической погоды, радиосвязи, навигации и устойчивости технических систем, чувствительных к ионосферным возмущениям.

Описанные проблемы определяют актуальность настоящей диссертационной работы, в которой во время ряда событий различных типов геомагнитных активизаций проведены детальные исследования морфологических свойств всплесков широкополосных геомагнитных пульсаций типа PiB, динамики распределения в ионосфере поперечных и продольных токов, а также свечения ночного неба.

### **Цель работы**

Изучить особенности развития геомагнитных пульсаций типа PiB и систем продольных токов в ходе различных типов геомагнитной активности. Показать новые возможности короткопериодных колебаний геомагнитного поля для таймирования, детектирования и анализа атмосферных и космических возмущений.

Для этого решаются следующие задачи:

- Исследовать события с разными типами геомагнитных возмущений (импульсы динамического давления солнечного ветра, пилообразные события, стационарная магнитосферная конвекция и магнитосферные бури и суббури).

- Изучить связь возникновения всплесков свечения ночного неба и пульсаций PiB с параметрами межпланетного магнитного поля, солнечного ветра и динамикой положения электроджетов и продольных токов.

- Адаптировать вейвлет-преобразование Морле для построения спектров геомагнитных пульсаций, свечения ночного неба, параметров ММП и СВ.
- Доказать возможность таймирования быстрых активизаций во время суббури и других типов геомагнитных возмущений с использованием цуга пульсаций P<sub>i</sub>V.
- Провести анализ обнаруженных ультракороткопериодных всплесков в вариациях геомагнитного поля и поиск источника их генерации.

### **Методы исследования**

В работе проведен анализ наземных данных о вариациях магнитного поля Земли в диапазоне геомагнитных пульсаций. Используются записи наблюдений вариаций  $X$ -,  $Y$ - (либо  $H$ -,  $D$ -) компонент геомагнитного поля с временным разрешением от 0.1 до 0.0156 с, полученные на сети станций Комплексной магнитно-ионосферной обсерватории ИСЗФ и канадской сети станций CARISMA [<https://carisma.ca/>]. Использовались также магнитные данные станции Патроны (IRT) с временным разрешением 1 с и данные вариаций ночного свечения среднеширотной станции Торы (TOR, обе станции принадлежат ИСЗФ СО РАН).

Помимо этого, в работе используются следующие данные спутниковых наблюдений, доступные на сайте НАСА [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html>]: параметров СВ — скорости  $V$  и динамического давления  $P_d$ , межпланетного магнитного поля (ММП) — вектора  $\vec{B}$ ; а также потоков электронов на геосинхронных орбитах по данным спутников LANL-1989 и LANL-1994. Кроме того, используются значения индексов авроральной ( $AE$ ,  $SME$ ) и магнитной ( $Dst$ ,  $SYM-H$ ,  $SMR$ ) активности по данным сайтов WDC Kyoto [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>] и SuperMAG [<https://supermag.jhuapl.edu/info/>]. Для обработки данных использовались такие методы, как вейвлет-анализ для проведения спектрально-временного анализа геомагнитных пульсаций и интенсивности свечения ночного неба, а также техника инверсии магнитограмм (ТИМ) ИСЗФ СО РАН для построения временных рядов карт ПТ — по магнитным вариациям, зарегистрированным на глобальной сети магнитометров, данные которых доступны на сайте SuperMAG. Для изучения взаимосвязи электрических разрядов холодной плазмы, возникающих в

мезосфере и термосфере, с регистрацией глобально наблюдаемых ультракоротко-периодных импульсов использованы результаты пространственной и временной фиксации красных спрайтов в Северном Китае [Wang et al., 2019].

### **Научная новизна**

1. Впервые установлено, что импульсы динамического давления СВ при южной ориентации ММП инициируют усиление ионосферных и продольных токов, что сопровождается расширением частотного диапазона короткопериодных геомагнитных пульсаций типа P<sub>i</sub>B.

2. Продемонстрировано, что малая длительность цуга коротковолновой части всплеска P<sub>i</sub>B (пульсаций P<sub>i</sub>1B) позволяет с высокой точностью (до десятков секунд) таймировать взрывные начала геомагнитных возмущений независимо от их интенсивности.

3. Впервые выявлено локализованное геомагнитное событие, возникающее на фоне спада суббуревой активности в ходе магнитосферной бури, с использованием данных комплекса геофизических обсерваторий ИСЗФ СО РАН.

4. Разработан и реализован комплексный подход для анализа геомагнитных возмущений, объединяющий использование данных и их методы обработки: ионосферных и продольных токов, геомагнитных пульсаций, свечения ночного неба, параметров ММП и плазмы СВ, локальных и интегральных индексов геомагнитной активности.

5. Выполнена глобальная регистрация высокочастотных вариаций геомагнитного поля одновременно с возникновением красных спрайтов над Северным Китаем, на основе чего предложен новый способ их детектирования на межконтинентальной сети магнитных станций.

**Научная и практическая значимость работы** заключается в доказательстве возможности использования геомагнитных вариаций для оперативного мониторинга геомагнитных возмущений и отклика на атмосферные явления. Установленные зависимости пульсаций от уровня активности позволяют улучшить методы диагностики состояния магнитосферы, что важно для систем прогнозирования событий с повышенным уровнем геомагнитной активности. Выявленные пре-

имущества P<sub>1</sub>B-пульсаций перед P<sub>2</sub> в точности определения времени активизации возмущений открывают перспективы для улучшения существующих систем мониторинга. Связь P<sub>1</sub>B-пульсаций с положением авроральных электроджетов и ПТ расширяет возможности комплексного анализа ионосферных процессов. Полученные данные применимы для уточнения моделей магнитосферно-ионосферного взаимодействия и интерпретации спутниковых наблюдений. Предложен способ получения статистических характеристик Q-всплесков с использованием данных геомагнитных вариаций на широкой сети геомагнитных станций.

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

1. Импульсы давления солнечного ветра при южном ММП, а также суббури, пилообразные события и события стационарной магнитосферной конвекции вызывают генерацию всплеска пульсаций типа P<sub>1</sub>B с длительностью цуга менее 0.5 мин, что позволяет точнее, чем по цугам пульсаций P<sub>2</sub>-3, определять начало активных фаз указанных геомагнитных возмущений.

2. Во время сильной суббури в вечернем секторе полярной шапки втекание продольных токов и образование западного электроджета севернее восточного приводят к возникновению там интенсивных геомагнитных возмущений.

3. Совместный анализ пульсаций P<sub>1</sub>B и свечения атомарного кислорода на длинах волн 630.0 нм и 557.7 нм позволил обнаружить «локальное геомагнитное событие» между двумя суббурями на средних широтах в околополуночном секторе с интенсивностью пульсаций и свечения вдвое большей, чем во время сильной суббури.

4. На разнесенных на 180 градусов по долготе меридиональных цепочках индукционных магнитометров обнаружен ряд событий регистрации затухающих электромагнитных импульсов длительностью менее 2 секунд, связанных с возникновением красных спрайтов над Северным Китаем.

**Достоверность полученных результатов** в данном исследовании обеспечивается применением стандартизированного геофизического оборудования, включая наземные и спутниковые приборы, использованием общепринятых индексов геомагнитной активности, а также современными методами обработки и анализа

данных. Ключевые выводы диссертации согласуются с ранее опубликованными научными данными и дополняют их новыми аспектами.

### **Личный вклад автора**

Результаты, представленные в диссертации, получены лично автором или на равных правах с соавторами публикаций. Автором выполнены первичная подготовка и обработка данных, проведен вейвлет-анализ с помощью написанных лично программ, получены графические представления результатов. Интерпретация результатов анализа данных в исследованиях проводилась лично автором либо в тесной коллаборации с соавторами. Диссертант принимал непосредственное участие в подготовке публикаций по теме диссертации.

### **Апробация работы**

Основные результаты докладывались на Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» (Иркутск, 2022), на Российско-Китайской конференции по космической погоде (Иркутск, 2024), на Российско-Монгольской международной конференции по астрономии и геофизике «Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона» (Иркутск, 2023), на семинарах Annual seminar "Physics of Auroral Phenomena" (ПГИ КНЦ РАН, Апатиты, 2023, 2024, 2025); на конференции «Interntonal conferense on substorms ICS-15» (Deqing, China, 2023); на IX Всероссийской школе-семинаре по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского, Л.Л. Ваньяна и В.И. Дмитриева (Иркутск, 2025); на школе-конференции с международным участием «Проблемы гео-космоса» (Санкт-Петербург, 2024); на конференции «Физика плазмы в Солнечной системе» (ИКИ РАН, Москва, 2023), на научных семинарах ИСЗФ СО РАН.

### **Соответствие паспорту специальности**

Задачи диссертационной работы и полученные результаты соответствуют областям исследований специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия» в части пунктов 1, 11 и 13.

## **Публикации**

Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, включенных в список ВАК или в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 129 страницы, включая 40 рисунков. Список цитируемой литературы состоит из 150 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** сформулирована актуальность темы диссертации, дан краткий обзор текущего состояния исследований геомагнитных вариаций и динамики продольных токов, указаны цели работы и описаны решаемые задачи, отражена научная новизна и значимость данного исследования. Приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы.

**В главе 1** приведен обзор литературы, посвященной длиннопериодным и короткопериодным типам геомагнитных возмущений. Рассмотрены основные индексы геомагнитной активности, используемые в научных работах, изучающих физику магнитосферы Земли.

**В разделе 1.1** описаны основные явления космической погоды, вызывающие длиннопериодные вариации, такие как магнитосферные бури длительностью порядка суток и менее длительные активизации — изолированные суббури, пилообразные возмущения (sawtooth events) и события стационарной магнитосферной конвекции (steady magnetospheric convection) длительностью от нескольких часов до полусуток. Рассматривается динамика параметров СВ и ММП, глобального геомагнитного поля Земли, высыпаний в атмосфере энергичных частиц, усиления ионосферных ПТ, свечений ночного неба на высоких и средних широтах, сопровождающих эти виды геомагнитных вариаций. Приводится описание и детальный анализ поведения геомагнитных индексов в ходе исследуемых событий (рисунок 1). Излагаются физические основы и описываются механизмы генерации длинно-

периодных геомагнитных вариаций. Анализ строится на обзоре классических [McPherron et al., 1973; Акасофу, Чепмен, 1975; Sergeev, 1977; Сергеев, Цыганенко, 1980; Нишида, 1980; Kamide, Baumjohann, 1993] и современных [Kamide, Maltsev, 2007; Веселовский, Кропоткин, 2010; De Michelis, 2011; Koskinen, 2011; Koskinen, Kilpua, 2022; Sergeev et al., 2018; Akasofu, 2020; Alberti et al., 2022] исследований, посвященных природе геомагнитных возмущений.

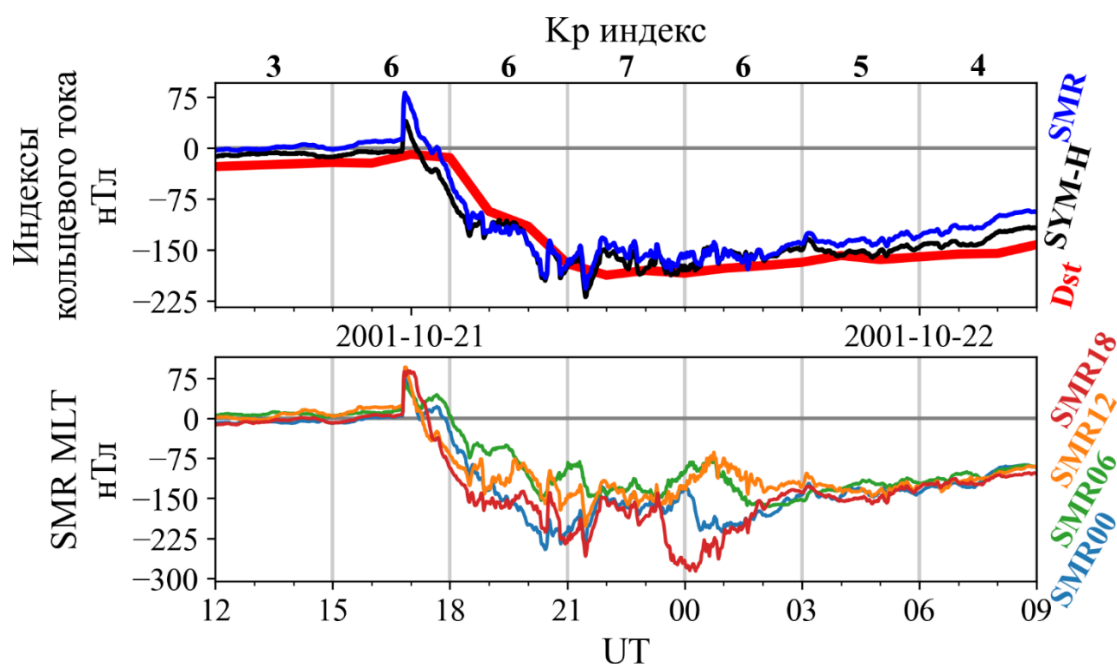


Рисунок 1. Магнитосферная буря 21–22 октября 2001 г. Верхняя панель — сравнение индексов кольцевого тока  $Dst$ ,  $SYM-H$ ,  $SMR$ ; вверху приведены значения  $Kp$ -индекса. Нижняя панель — индексы кольцевого тока  $SMR MLT$

**Раздел 1.2** посвящен короткопериодным геомагнитным вариациям (геомагнитным пульсациям) — магнитогидродинамическим (МГД) волнам, представляющим собой вариации магнитного поля в диапазоне периодов от долей секунд до десятков минут. Одним из важных прикладных аспектов их исследований является диагностика процессов в СВ и вызываемых ими возмущений магнитосферы Земли. Рассмотрена классификация пульсаций, принятая на Ассамблее Международной ассоциации по геомагнетизму и аэронауке (МАГА) [Гульельми, Троицкая, 1973; Saito, 1978], описаны основные типы пульсаций и природа их возникновения. Описание дополняется обзором литературы, посвященной данному вопросу [Троицкая, Гульельми, 1969; Гульельми, Троицкая, 1973; Пудовкин и др., 1976; Потапов, 1974; Mishin, 1981, 1993; Kangas, 1998; Parkhomov et al., 2003] и

другие. Особое внимание в разделе уделено всплескам (широкополосным цугам) иррегулярных пульсаций типа PiB (которые состоят из короткопериодной части — Pi1B ( $T < 40$  с) и длиннопериодной (Pi2, Pi3)  $40 < T < 600$  с [Kangas, 1998; Mishin et al., 2020]) и возможности использования Pi1B для повышения точности таймирования взрывных фаз геомагнитных возмущений за счет малой ширины спектра Pi1B. Типичный пример цуга таких пульсаций показан на рисунке 2.

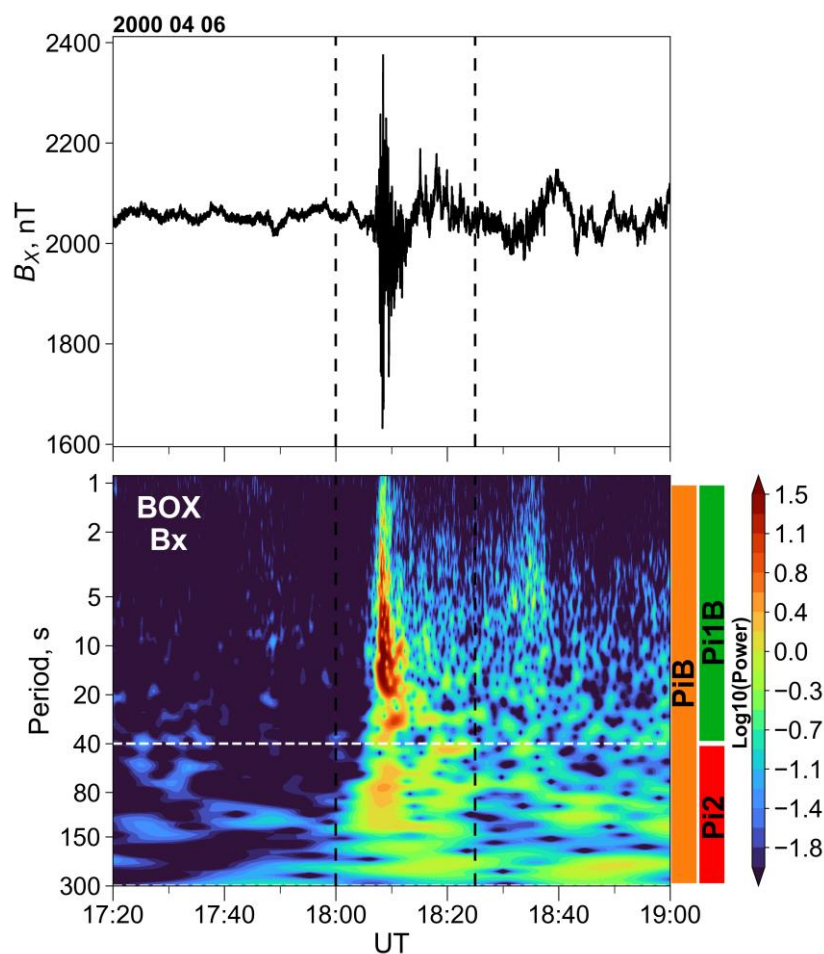


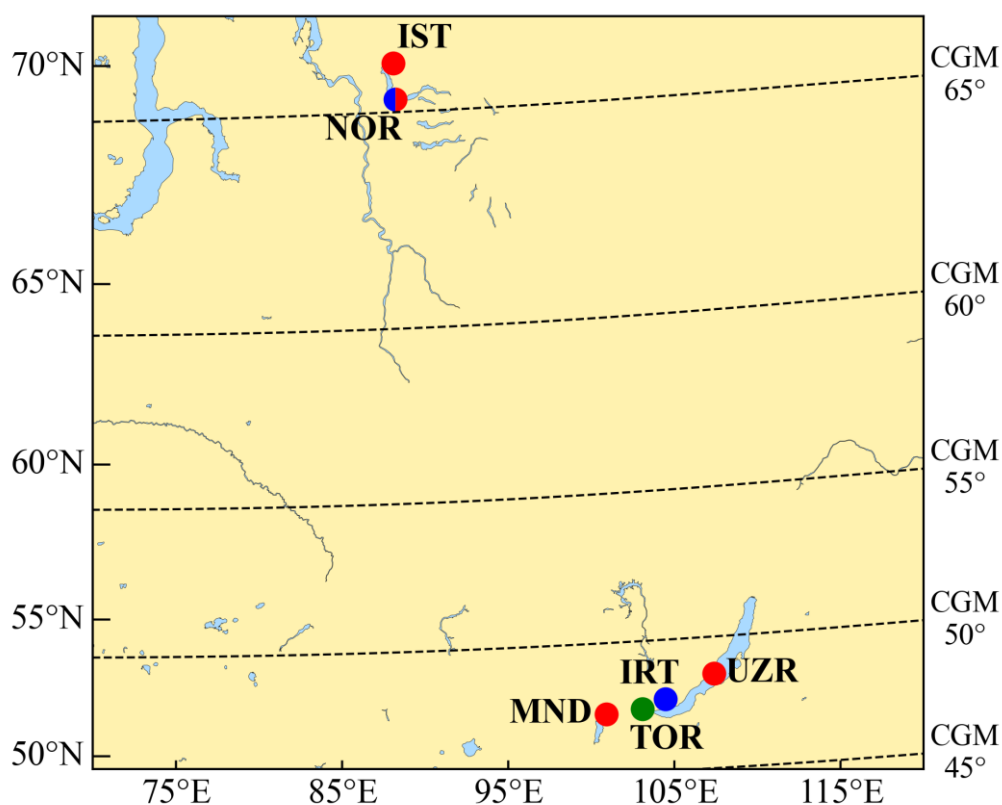
Рисунок 2. Верхняя панель — осциллограмма вариаций  $B_x$ -компоненты геомагнитного поля на станции Борок, содержащая цуг пульсаций типа PiB. Нижняя панель — их вейвлет-спектрограмма. Границы цуга PiB обозначены вертикальными штриховыми линиями. Справа показан морфологический состав цуга (Pi1B, Pi2 Pi3)

В диссертационной работе этот тип иррегулярных пульсаций играет ключевую роль в определении взрывных фаз изучаемых длиннопериодных геомагнитных возмущений. При этом главную роль в генерации этих видов пульсаций играет динамика как электроджетов (областей максимумов интенсивности попереч-

ных токов в E-слое авроральной ионосферы), т. е. резкое усиление токов, так и высыпаний частиц в этих областях во время геомагнитных возмущений.

**Во второй главе** приведены основные источники данных, используемых в диссертационной работе, и методы их обработки.

**В разделе 2.1** проводится обзор станций регистрации основного объекта исследования диссертационной работы — геомагнитных пульсаций. Описываются характеристики индукционных магнитометров, используемых для записи геомагнитных вариаций, и допустимые погрешности регистрации. На рисунке 3 приведена карта станций Комплексной магнитно-ионосферной обсерватории (КМИО) ИСЗФ СО РАН.



*Рисунок 3.* Карта станций регистрации, данные которых используются в диссертационной работе. Регистрация геомагнитных пульсаций — красные маркеры, постоянного магнитного поля и его вариаций — синие, наблюдения свечения ночного неба — зеленый. По осям отложены географические координаты. Штриховыми линиями показаны геомагнитные параллели в системе CGM (соответствующие значения геомагнитной широты проставлены вдоль правой вертикальной оси)

Такая разнесенная цепочка станций позволяет детально проводить анализ динамики пульсаций как во времени, так и в пространстве, а большой архив дан-

ных (с 2000 года) этих станций обеспечивает возможность статистического анализа разнообразных типов геомагнитных явлений.

Раздел включает обзор используемых в работе дополнительных данных и их источников: геомагнитных индексов  $AE$ ,  $AU$ ,  $AL$ ,  $SME$ ,  $SMU$ ,  $SML$ ,  $Dst$ ,  $SMR$ ,  $SMR$ ,  $LT$ ,  $SYM-H$  и  $ASY-H$  (WDC Kyoto и SuperMAG), геомагнитных вариаций (сеть магнитометров SuperMAG и сеть IMAGE), свечения ночного неба (станция TOR), потоков низкоэнергичных (50–225 кэВ) электронов (геосинхронные спутники LANL 1989 и LANL 1994), а также геомагнитных пульсаций (сеть станций CARISMA).

**В разделах 2.2 и 2.3** описываются основные методы обработки данных, используемые для анализа динамики УНЧ электромагнитных колебаний и токовых систем в ходе магнитосферных бурь и суббурь: вейвлет-преобразование (раздел 2.2) и методика построения карт ПТ на основе техники инверсии магнитограмм ИСЗФ СО РАН (раздел 2.3).

**В главе 3** проводится анализ возбуждения всплесков широкополосных геомагнитных пульсаций импульсами динамического давления солнечного ветра ( $P_d$  СВ) во время внезапного начала (SSC) и в ходе нескольких сильных магнитосферных бурь. Исследование дополняется изучением динамики положения аврорального овала с использованием карт ПТ ТИМ. Оценивается влияние расположения овала относительно станции регистрации, а также знака вертикальной компоненты ММП на регистрацию пульсаций.

**В разделе 3.1** в качестве первого примера сильной магнитосферной бури с импульсами  $P_d$  СВ рассматривается событие 21 октября 2001 года, когда индекс кольцевого тока достигал  $Dst_{\min} = -184$  нТл (рисунок 4), сопровождаемое интенсивной генерацией пульсаций типа PiB. На главной фазе магнитосферной бури наблюдались три полуторачасовых интервала, на которых сильное повышение  $P_d$  СВ (до  $P_d = 35$  нПа) сопровождалось почти синхронными усилением геомагнитной активности (рост индекса  $AE$  до 1700 нТл) и расширением овала полярных сияний и южной границы ПТ на средние широты.

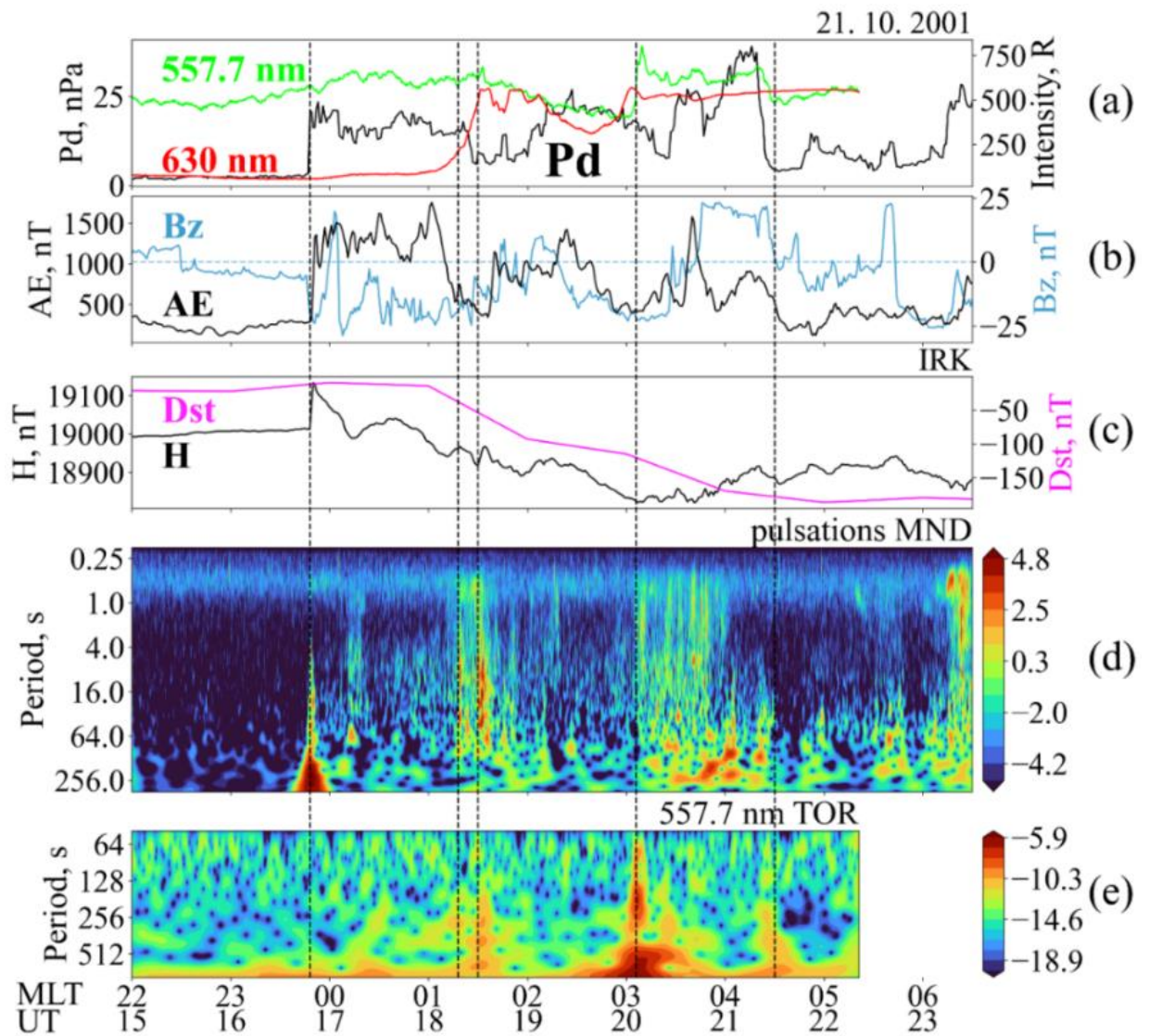


Рисунок 4. Магнитосферная буря 21 октября 2001 года. Вариации давления СВ  $P_d$  и интенсивностей излучения 557.7 и 630 нм (a),  $AE$ -индекса и  $B_z$ -компоненты ММП (b),  $H$ -компоненты геомагнитного поля (1-минутные данные обсерватории IRK) и  $Dst$ -индекса (c), а также динамические спектры геомагнитных пульсаций (d) и интенсивности свечения линии 557.7 нм (e)

Показано, что под воздействием импульсов  $P_d$  СВ резко меняются продольные и ионосферные токи, что обычно сопровождается высыпанием энергичных электронов. Это два фактора, вызывающие генерацию всплесков короткопериодных пульсаций типа Pi1B в ионосферном альфвеновском резонаторе [Mishin et al., 2020]. Было обнаружено также, что амплитуда модуляции геомагнитной активности импульсами  $P_d$  во втором и третьем интервалах главной фазы была ослаблена вариациями ММП (рисунок 4). Так, меньшая амплитуда третьего пика в вариациях  $AE$ -индекса в 21:00 UT связана с поворотом ММП с юга на север. Этот факт

согласуется с выводами [Mishin, 2016] об усилении сжатия магнитосферы и расширения полярной шапки положительными импульсами  $P_d$  при «включении» южного ММП. Следует также отметить, что наблюдается ограничение нижней границы диапазона периодов геомагнитных пульсаций типа PiB, генерируемых импульсами давления, до  $T = 10$  с во время поворота вертикальной компоненты ММП на север.

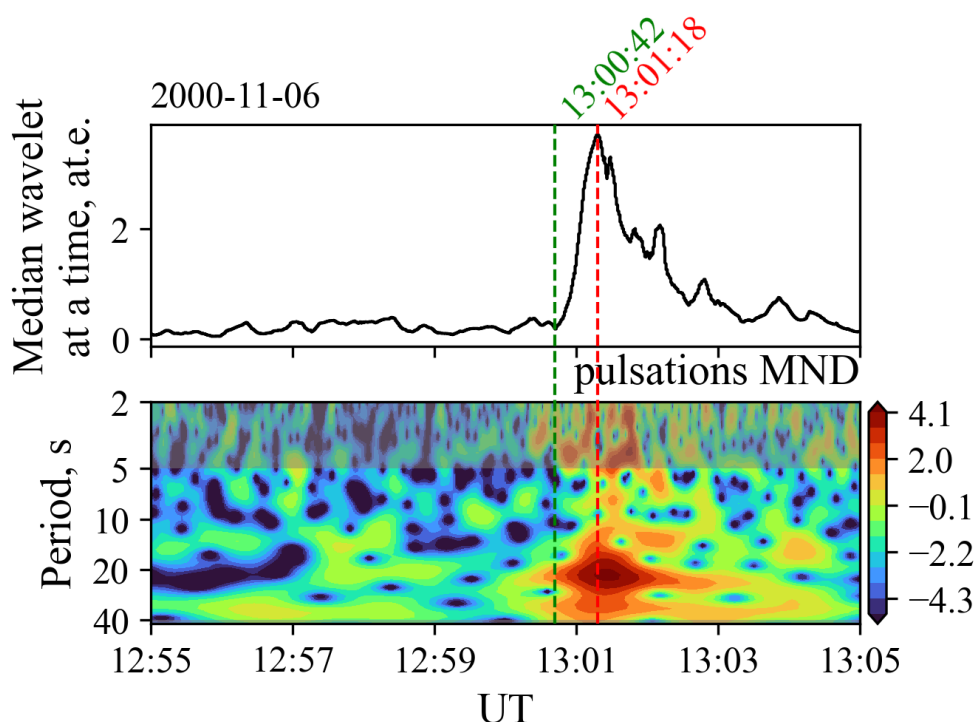
**В разделе 3.2** рассмотрены импульсы  $P_d$  СВ, которые наблюдались во время магнитосферной бури 20 декабря 2015 года с 00:00 до 18:00 UT. Результат анализа подтверждает геомагнитную динамику, описанную в **разделе 3.1**. По результатам анализа двух событий сделан вывод о том, что ключевую роль в развитии геомагнитной активности играет предшествующая ей ориентация ММП. Если импульс  $P_d$  приходит на фоне длительного существования южной  $B_z$ -компоненты, то есть на поздней фазе накопления магнитной энергии в хвосте магнитосферы, он запускает взрывную фазу суббури. В то же время импульсы, приходящие при северном ММП или сразу после поворота  $B_z$  на юг (начальная фаза накопления), не инициируют развитие суббури.

Таким образом, при южной ориентации ММП импульсы динамического давления солнечного ветра служат триггером суббуревой активности, приводя к усилению и расширению ионосферных и продольных токов, а также к генерации широкополосных геомагнитных пульсаций типа PiB с расширением спектра в диапазон Pi1B.

**Глава 4** посвящена анализу динамики геомагнитных пульсаций, токовых систем и свечения ночного неба в ходе различных видов событий с повышенной геомагнитной активностью, описанных в главе 1, с использованием данных и методологии, описанных в главе 2.

**В разделе 4.1** исследуются всплески широкополосных пульсаций (PiB) и свечения ночного неба во время двух пилообразных событий (sawtooth events, STE). Обсуждается возможность периодических активизаций суббури во время STE из-за глобальной неустойчивости хвоста магнитного поля и возбуждения ночного альфвеновского резонатора. Анализируется влияние положения границы

авроральных сияний на генерацию пульсаций и свечения. Показано, что всплески пульсаций PiB обычно отмечают начало взрывной фазы STE, совпадая с ростом индекса AE. В этих широкополосных всплесках короткопериодная компонента PiB (Pi1B с  $T = 1\text{--}40$  с) имеет значительно меньшую длительность по сравнению с длиннопериодными пульсациями Pi2/Pi3 [Mishin et al., 2020]. Для точного определения моментов начала суббури применяется вейвлет-анализ спектра с расчетом медианной вариации мощности  $P(t)_{\text{med}}$  в диапазоне Pi1B ( $T = 5\text{--}40$  с), исключая высокочастотный шум с  $T < 5$  с (рисунок 5).



*Рисунок 5.* Пример использования начала всплеска среднего значения мощности спектра пульсаций  $P(t)_{\text{med}}$  в качестве индикатора начала взрывной фазы суббури (начала всплеска индекса AE): вверху — изменение  $P(t)_{\text{med}}$  в условных относительных единицах; внизу — спектральная мощность в зависимости от периода и всемирного времени. Вертикальные штриховые зеленая и красная линии указывают начало и максимум скачка  $P(t)_{\text{med}}$

Начало и пик каждого всплеска  $P(t)_{\text{med}}$  (отмечены соответственно зеленой и красной штриховыми линиями), как правило, совпадают с резким ростом индекса AE, возмущениями  $H$ -компоненты геомагнитного поля и инжекциями энергичных электронов на геостационарной орбите.

**В разделе 4.2** рассматривается суперсуббури (сильная суббури) в ходе магнитосферной бури 20 декабря 2025 г. Проводится анализ токовых систем и рассмат-

ривается образование дополнительного западного электроджета (AWEJ) полярнее классического восточного электроджета, расположенного на границе зон ПТ R2 в вечернем секторе. Построенная модель токов и геомагнитного поля на рисунке 6 наглядно демонстрирует динамику знаков вариаций X- и Z-компонент на цепочке станций IMAGE [https://space.fmi.fi/image/www/index.php?page=user\_defined] и подтверждает необходимость существования высокоширотного AWEJ вблизи полярной шапки, полученной на картах ТИМ ПТ.

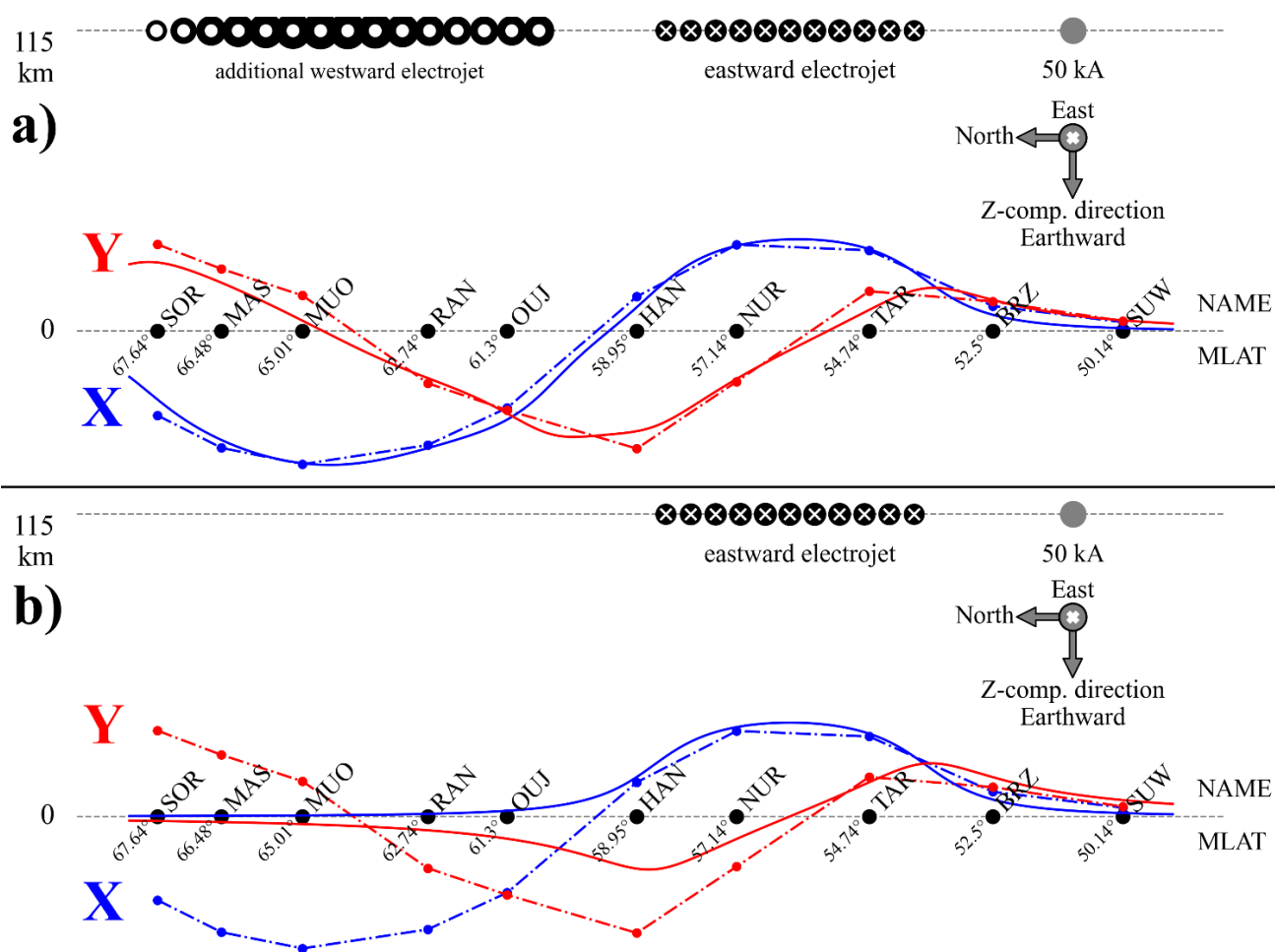


Рисунок 6. Моделирование X- (синий цвет) и Z- (красный цвет) компонент на поверхности Земли вдоль цепочки IMAGE в присутствии AWEJ и EEJ (a) и только EEJ (b). Сплошными линиями представлено смоделированное поле; прерывистые линии показывают поле по данным станций IMAGE в 16:14 UT

Анализ дополняется исследованием динамики геомагнитных пульсаций PiB, ионосферных и продольных токов и свечений на длинах волн 557.7 и 630.0 нм атомарного кислорода ( $O(^1S)$  и  $O(^1D)$  соответственно).

**В разделе 4.3** демонстрируется возможность генерации пульсаций типа PiB не только в ходе взрывных геомагнитных возмущений типа суббури, но и в ходе событий стационарной магнитосферной конвекции — энергетически более слабого и спокойного типа геомагнитных возмущений. Полученные в главе 4 результаты подчеркивают необходимость комплексного подхода, сочетающего наземные магнитные и оптические наблюдения со спутниковыми измерениями, для выяснения механизмов возбуждения и пространственно-временной эволюции данных пульсаций

**В главе 5** показана возможность использования геомагнитных пульсаций для решения обратной задачи — отслеживания развития геомагнитного возмущения по началу генерации геомагнитных пульсаций типа PiB и увеличению светимости ночного неба в условиях, когда повышение геомагнитной активности не регистрируется классическими методами. Для примера рассматривается событие 20 декабря 2015 года (рисунок 7), где имело место значительное увеличение интенсивности свечения ночного неба в линиях 630.0 нм (в ~ 3 раза) и 557.7 нм (в ~ 2 раза), сопровождаемое генерацией широкополосных пульсаций типа PiB, в условиях снижающейся геомагнитной активности и ослабления кольцевого тока. Мы дали этому событию название «локализованное геомагнитное событие» (ЛГС, LGE).

**В разделе 5.1** рассмотрены геомагнитные условия, сопровождающие ЛГС: параметры СВ и ММП, вариации магнитного поля на наземных станциях глобальной цепочки SuperMAG, динамика ПТ и свечения ночного неба.

**В разделе 5.2** выдвинуто предположение о источнике возникновения ЛГС. В качестве источника ЛГС рассматривается высыпание частиц кольцевого тока. Их энергия позволяет объяснить локализацию события на средних широтах, генерацию пульсаций начиная со средних широт до авроральных, слабую интенсификацию электроджетов и ПТ, снижение интенсивности кольцевого тока в ночном MLT-секторе, а также развитие свечения на средних широтах.

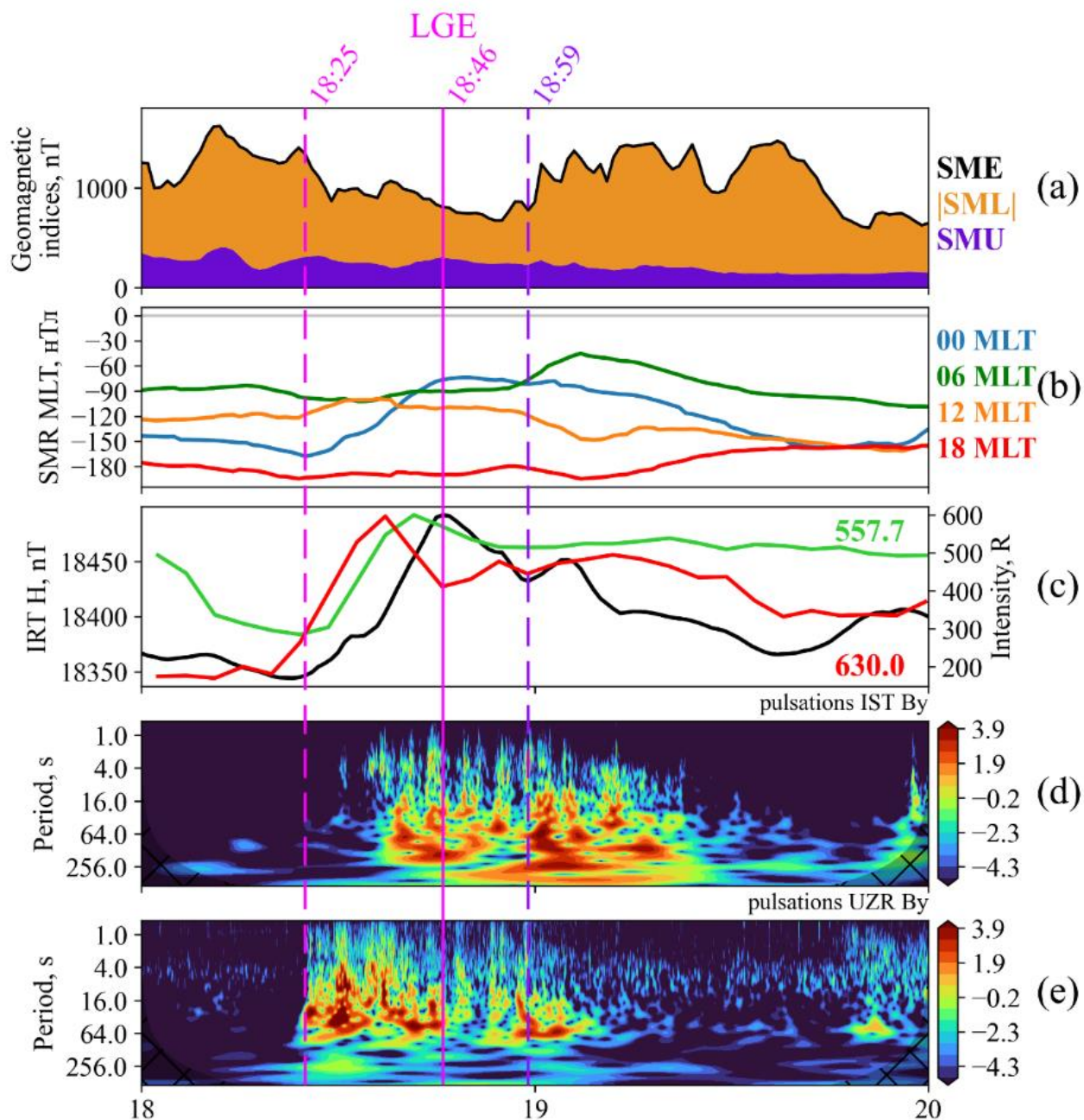


Рисунок 7. Локальное геомагнитное событие 20 декабря 2015 г. График с накоплением (stack plot) индексов авроральных электроджетов  $|SML|$ ,  $SMU$  (a); черная линия — индекс  $SME$ ; индексы кольцевого тока по секторам MLT  $SMR-00$ ,  $SMR-06$ ,  $SMR-12$ ,  $SMR-18$  (b);  $H$ -компонента геомагнитного поля на ст. IRT и интенсивность свечения  $[OI]$  557.7 и 630.0 нм (c); динамические спектры компоненты  $B_y$  геомагнитных пульсаций на станциях Исток (IST, d) и Узур (UZR, e)

В разделе 5.3 выполнен детальный анализ динамических спектров пульсаций с расширенным диапазоном амплитуд во время ЛГС. Он показал, что пульсации, наблюдаемые в ходе события на разных широтах, имеют схожие частотные максимумы и в целом имеют одну морфологию, однако генерация пульсаций в нача-

ле события значительно интенсивнее на средних широтах, чем на высоких. Таким образом, объяснить особенности их генерации удастся только в том случае, если источник генерации приходится на средние широты, чему может служить подтверждением ослабление кольцевого тока, обусловленное, по всей видимости, высыпанием его высокоэнергичных частиц.

**В главе 6** рассматриваются синхронные, глобально наблюдаемые ультракороткопериодные импульсы (УКИ), регистрируемые в широком долготном секторе (от Восточной Сибири до Канады) на сети станций, оборудованных индукционными датчиками с частотами дискретизации  $f \geq 40$  Гц. Проанализированы отобранные события, а также получены статистические характеристики обнаруженных сигналов. Показана связь сигналов с развитием красных спрайтов в Северном Китае.

**В разделе 6.1** приведен обзор результатов наблюдений УКИ в атмосфере. Указанные возмущения регистрируются синхронно на сети геомагнитных станций ИСЗФ СО РАН как в средних (станции MND и UZR), так и в высоких широтах (станция IST), что свидетельствует о широком пространственном масштабе наблюдаемого явления. Проведен статистический анализ 150 случаев УКИ в пяти 5-минутных интервалах, отобранных в пределах суток 16 апреля 2019 г. Пример обнаруженных сигналов показан на рисунке 8. Основная энергия исследуемых УКИ сосредоточена в диапазоне частот от 4 до 32 Гц.

**В разделе 6.2** выполнен анализ наблюдений УКИ на разных долготах с использованием данных канадской сети CARISMA. Были измерены временные задержки между первыми экстремумами УКИ на указанных станциях. Полученные значения варьировались в пределах от 0 (с учетом конечности интервала дискретизации) до 0.03 с. Высказано предположение о связи УКИ с глобальной грозовой активностью. Проведен расчет времени распространения излучения из очагов повышенной грозовой активности по данным [Christian et al., 2003] до станций регистрации вариаций магнитного поля. Анализ показывает, что при распространении со скоростью света ожидаемые задержки оказываются на пределе или за пределами временного разрешения нашей измерительной системы. В случае расположе-

ния источника в Южной Америке или Азии теоретическая задержка может быть выявлена, однако для Африканского региона или для источников на широтах более высоких, чем использованные в расчетах, УКИ при текущем разрешении будут регистрироваться на всех станциях практически синхронно.

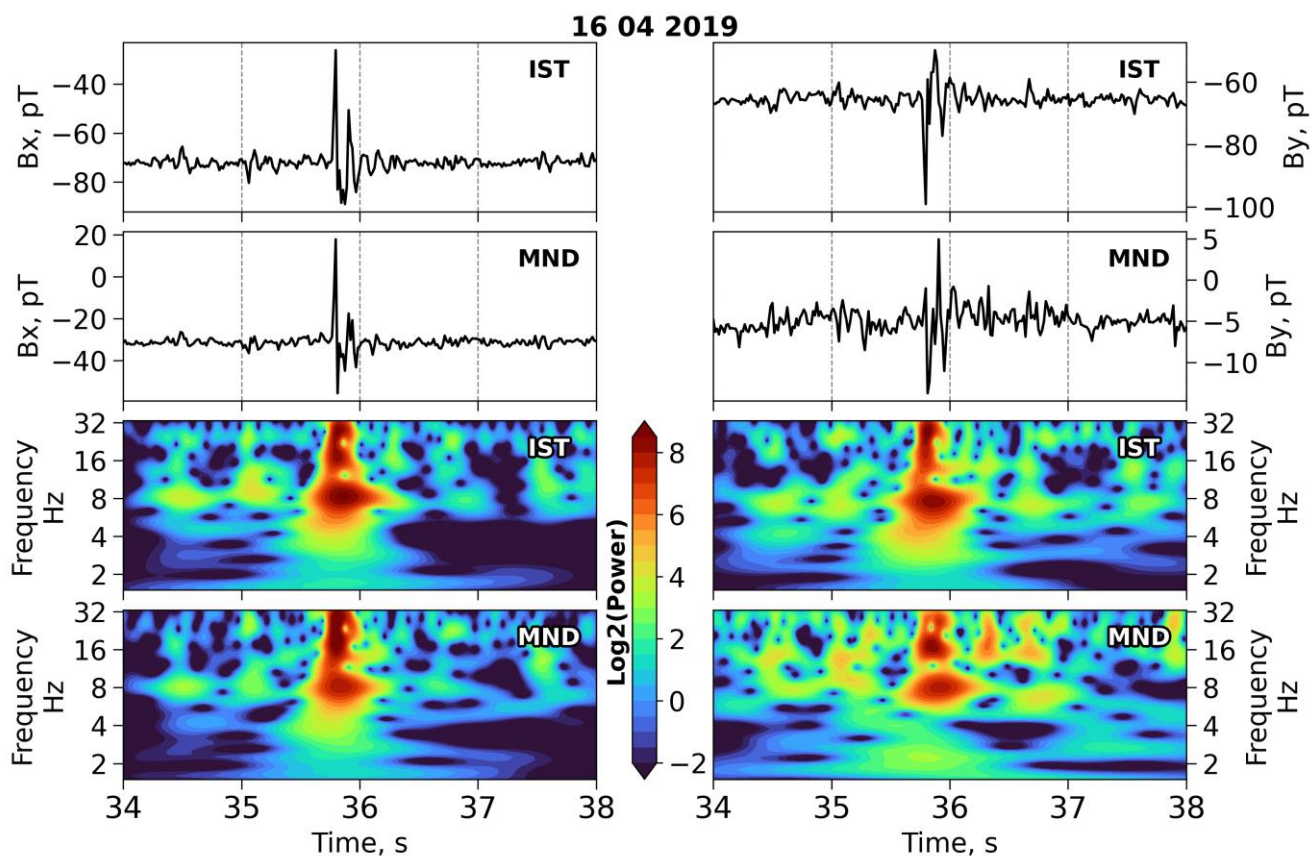


Рисунок 8. УКИ, наблюдавшиеся в компонентах  $B_x$  (две верхние левые панели) и  $B_y$  (две верхние правые панели) на станциях Исток и Монды 16 апреля 2019 года в 19:13:36 UT, и соответствующие динамические спектры (третьи и четвертые панели сверху)

В разделе 6.3 исследуется возможная связь УКИ с глобальной грозовой активностью. Вопреки существующим представлениям, акцентирующим роль локальных гроз, стабильная регистрация УКИ, в том числе в зимний период, указывает на удаленный источник. Выдвинуто предположение, что такими источниками могут быть грозовые процессы в экваториальном поясе, а механизмом воздействия — электромагнитное излучение молниевых разрядов, способное распространяться на глобальные расстояния.

Проверка данной гипотезы показала, что характеристики обычных молний (спектр, частота возникновения) плохо согласуются с наблюдаемыми свойствами УКИ. Последующий анализ позволил идентифицировать более вероятный источник — высотные разряды (красные спрайты), чей низкочастотный спектр (пик ~40 Гц) и глобальная частота появления (несколько событий в минуту) значительно лучше соответствуют параметрам УКИ.

**В разделе 6.4** проводится сопоставление регистрации УКИ на станциях КМИО и сети CARISMA с возникновением красных спрайтов в Северном Китае, описанных в статье [Wang et al., 2019]. Анализ показал, что за каждым из шести случаев наблюдения красных спрайтов в данных комплексной магнитной сети (КМИО и CARISMA) последовательно фиксировались события, соответствующие УКИ.

Проведенный нами анализ обнаруженных УКИ в вариациях геомагнитного поля показал полное их соответствие Q-всплескам (кратковременным затухающим колебаниям электрического поля, ранее ассоциированным с красными спрайтами в [Huang et al., 1999; Paras, Rai, 2012]) как в морфологических параметрах, так в амплитудно-частотных характеристиках сигналов и в источнике их происхождения в виде красных спрайтов. Таким образом, использование данных геомагнитных вариаций может быть расширено для проведения статистического анализа Q-всплесков, что и было продемонстрировано в разделе 6.1.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

1. Импульсы давления солнечного ветра при южном ММП, а также суббури, пилообразные события и события стационарной магнитосферной конвекции вызывают генерацию всплеска пульсаций типа P<sub>1</sub>B с длительностью цуга менее 0.5 мин, что позволяет точнее, чем по цугам пульсаций P<sub>1</sub>2–3, определять начало активных фаз указанных геомагнитных возмущений.

2. Во время сильной суббури в вечернем секторе полярной шапки втекание продольных токов и образование западного электроджета севернее восточного приводят к возникновению там интенсивных геомагнитных возмущений.

3. Совместный анализ пульсаций PiB и свечения атомарного кислорода на длинах волн 630.0 нм и 557.7 нм позволил обнаружить «локальное геомагнитное событие» между двумя суббурями на средних широтах в околополуночном секторе с интенсивностью пульсаций и свечения вдвое большей, чем во время сильной суббури.

4. На разнесенных на 180 градусов по долготе меридиональных цепочках индукционных магнитометров обнаружен ряд событий регистрации затухающих электромагнитных импульсов длительностью менее 2 секунд, связанных с возникновением красных спрайтов над Северным Китаем.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Marchuk, R. A.** Synchronous globally observable ultrashort-period pulses / **R.A. Marchuk**, A.S. Potapov, V.V. Mishin // *Solar-Terrestrial Physics*. — 2022. — Vol. 8, iss. 2. — P. 47–55. — DOI: 10.12737/stp-82202207.

2. **Marchuk, R. A.** Geomagnetic disturbances and midlatitude airglow during the 20 December 2015 magnetospheric storm / **R.A. Marchuk**, V.V. Mishin, Y.V. Penskikh, Y.Yu. Klibanova, A.V. Mikhalev // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2025. — Vol. 130, e2025JA033979. — DOI: 10.1029/2025JA033979.

3. **Marchuk, R. A.** Bursts of geomagnetic pulsations during stationary magnetospheric convection events / **R.A. Marchuk** // *System Analysis and Mathematical Modeling*. — 2025. — Vol. 7, № 1. — P. 124–133. — DOI: 10.17150/2713-1734.2025.7(1).124-133.

4. Mishin, V. V. Effect of Substorms on the development of magnetic storms in different MLT sectors / V.V. Mishin, **R.A. Marchuk**, Y.V. Penskikh // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* — 2025. — Vol. 89. — P. 639–648. — DOI: 10.1134/S1062873825710955.

5. Mishin, V.V. Midlatitude bursts of PiB geomagnetic pulsations and night airglow during stormtime sawtooth events / V.V. Mishin, Yu.Yu. Klibanova, **R.A. Marchuk**, A.V. Mikhalev, Y.V. Penskikh // *Advances in Space Research*. — 2024. — Vol. 73, iss. 7. — P. 3708–3721. — DOI: 10.1016/j.asr.2023.06.032 .

6. Mishin, V. V. Bursts of geomagnetic pulsations and night airglow caused by solar wind pressure changes during a magnetic storm / V.V. Mishin, Yu.Yu. Klibanova, A.V. Medvedev, A.V. Mikhailov, Yu.V. Penskykh, **R.A. Marchuk** // Doklady Earth Sciences. — 2022. — Vol. 504, № 2. — P. 189–194. — DOI: 10.31857/S2686739722060123.

#### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Т. 2. М.: Мир, 1975. 510 с.  
Веселовский И.С., Кропоткин А.П. Физика межпланетного и околоземного пространства: учебное пособие. М.: Университетская книга, 2010. 116 с.

Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.

Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.

Потапов А.С. Возбуждение геомагнитных пульсаций типа Pc3 перед фронтом околоземной ударной волны пучком отраженных протонов // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. 1974. Вып. 34. С. 3–12.

Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 2: Короткопериодные колебания геомагнитного поля. Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. 271 с.

Сергеев В.А., Цыганенко Н.А. Магнитосфера Земли. М.:Наука, 1980. 174 с.

Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физических наук. 1969. Т. 97. С. 453–495.

Akasofu S-I. Relationship between geomagnetic storms and auroral/magnetospheric substorms: Early studies // Front. Astron. Space Sci. 2020. Vol. 7, 604755. DOI: 10.3389/fspas.2020.604755.

Alberti T., Faranda D., Consolini G., et al. Concurrent effects between geomagnetic storms and magnetospheric substorms // Universe. 2022. Vol. 8, 226. DOI: 10.3390/universe8040226.

Christian H.J., Blakeslee R.J., Boccippio D.J., et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2003. Vol. 108, D1. DOI: 10.1029/2002jd002347.

De Michelis P., Consolini G., Materassi M., Tozzi R. An information theory approach to the storm-substorm relationship // *Journal of Geophysical Research*. 2011. Vol. 116, A08225. DOI: 10.1029/2011JA016535.

Huang E., Williams E., Boldi R., et al. Criteria for sprites and elves based on Schumann resonance observations // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999. Vol. 116, iss. 104(D14). P. 16943–16964. DOI: 10.1029/1999jd900139.

Kamide Y., Baumjohann W. *Magnetosphere-Ionosphere Coupling*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1993 178 p.

Kamide Y., Maltsev Y. P. *Geomagnetic Storms* // *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*. Berlin: Springer, 2007. P. 355–374.

Kangas J. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations // *Space Science Reviews*. 1998. Vol. 83. P. 435–512.

Koskinen H. *Physics of Space Storms*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-00319-6.

Koskinen H.E.J., Kilpua E.K.J. *Physics of Earth's Radiation Belts*. Springer International Publishing, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-82167-8.

McPherron R.L., Russell C.T., Aubry M.P. Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms // *Journal of Geophysical Research*. 1973. Vol. 78, iss. 16. P. 3131–3149.

Mishin V.V., Mishin V.M., Karavaev Y., et al. Saturation of superstorms and finite compressibility of the magnetosphere: Results of the magnetogram inversion technique and global PPMLR-MHD model // *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43. P. 6734–6741. DOI: 10.1002/2016GL069649.

Mishin V.V., Tsegmed B., Klibanova Yu.Yu., Kurikalova M.A. Burst geomagnetic pulsations as indicators of substorm expansion onsets during storms // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2020. Vol. 125, e2020JA028521.

Mishin V.V. On the MHD instability of the Earth's magnetopause and its geophysical effects. *Planetary and Space Science*. 1981. Vol. 29, iss. 3. P. 359–363. DOI: 10.1016/0032-0633(81)90024-6.

Mishin V.V. Accelerated motions of the magnetopause as a trigger of the Kelvin–Helmholtz instability // *Journal of Geophysical Research*. 1993. Vol. 98, iss. 12. P. 21365–21372.

Paras M., Rai J. Electrical parameters of red sprites // *Atmósfera*. 2012. Vol. 25, no. 4. P. 371–380.

Parkhomov V.A. et al. Peculiarities of the magnetospheric response to pressure pulses in the solar wind as inferred from synchronous ground-based and satellite observations // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. 2003. Vol. 43, № 1. P. 21–28.

Saito T. Long-period irregular magnetic pulsation, Pi3 // *Space Science Reviews*. 1978. Vol. 21, iss. 4. P. 571–591.

Sergeev V.A. On the state of the magnetosphere during prolonged periods of the southward oriented IMF // *Phys. Solariterr. Potsdam*. 1977. Vol. 5. P. 39.

Sergeev V.A. et al. Magnetotail configuration during a steady convection event as observed by low-altitude and magnetospheric spacecraft // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2018. Vol. 123, iss. 10. P. 8390–8406.

Wang Y., Lu G., Ming M., et al. Triangulation of red sprites observed above a mesoscale convective system in North China // *Earth and Planetary Physics*. 2019. Vol. 3. P. 111–125. DOI: 10.26464/epp2019015.

URL: <https://carisma.ca/> (дата обращения 06.04. 2026).

URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html> (дата обращения 06.04. 2026).

URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 06.04. 2026).

URL: <https://supermag.jhuapl.edu/info/> (дата обращения 06.04. 2026).

URL: [https://space.fmi.fi/image/www/index.php?page=user\\_defined](https://space.fmi.fi/image/www/index.php?page=user_defined) (дата обращения 06.04. 2026).