

Министерство образования и науки РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОРНО-АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Научно-исследовательская лаборатория геофизики

УДК 550.38

“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор по НиИД

Сухова М.Г.

“ ____ ” _____ 2018 г.

ОТЧЕТ

о научно-исследовательской работе

по гранту РФФИ 16-45-040202_p_a

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУР В
ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ИОНОСФЕРНОГО АЛЬФВЕНОВСКОГО
РЕЗОНАТОРА И ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА НА ТЕРРИТОРИИ
ГОРНОГО АЛТАЯ

Научный руководитель:

к.т.н., зав. НИЛ геофизики

Гвоздарев А.Ю.

Горно-Алтайск, 2018

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель

Гвоздарев А.Ю.

Исполнители:

Учайкин Е.О.

Келюев С.В.

Колмаков А.А.

РЕФЕРАТ

Страниц 46, иллюстраций 28, использованных источников 10

Вариации геомагнитного поля, крайненизкочастотный электромагнитный фон, магнитные обсерватории, индукционные магнитометры, шумановские резонансы, спектральные резонансные структуры, ионосферный альфвеновский резонатор, грозоактивность, Горный Алтай

Проведен анализ данных за 2016 г. для индукционных магнитометров, установленных на магнитных станциях «Коларово» (Томская область) и «Байгазан» (Горный Алтай), находящихся на расстоянии 534 км. Построены динамические спектры вариаций в КНЧ диапазоне (до 30 Гц), определены параметры шумановских резонансов (частота, амплитуда, добротность). Определены среднемесячные и многолетние средние значения для обеих станций (за 2016-18 гг.), выявлено различие частот и добротностей (для Байгазана характерны более низкие частоты и более высокие добротности). Проведен корреляционный анализ рядов параметров ШР между различными станциями с целью выявления согласованности сезонной (месяц) и суточной динамики. Выявлено наличие корреляционной связи большой силы. Проанализирована динамика параметров ШР за 2015-18 г. Отмечено снижение частот для первых трех резонансов, наличие значительной годовой вариации для второй гармоники и полугодовой для третьей.

Создан новый пункт регистрации КНЧ электромагнитного фона в окрестностях с. Бичикту Бом (Онгудайский район). На станции установлен индукционный магнитометр, разработанный ГАГУ на основе датчика SCAT-120M (НИРФИ, Нижний Новгород). Датчики сориентированы в квазимеридиональном и квазиширотном направлении и заглублены в землю на 30 см. Частота регистрации – 100 Гц. Предварительный анализ данных показал, что пункт способен регистрировать первые два шумановских резонанса.

Проанализирована динамика доли дней с СРС за месяц на магнитной станции «Байгазан» за 2015-18 гг. Показано, что ей присуща годовая вариация амплитудой 27% с максимумом зимой, минимумом летом и средним значением 40%.

Разработана программа для выявления переотражения от верхней границы ионосферного альфвеновского волновода импульсов от идентифицированных грозových разрядов методом наложенных эпох, использующая данные индукционного магнитометра магнитной станции «Байгазан» и мировой сети регистрации грозových разрядов. Идентификация осуществлялась по совпадению времени разряда и импульса в пределах 0.1 с и совпадению угла прихода волны с рассчитываемым по сигналам для 1-го и второго шумановского резонанса угла пеленгации разряда. Проведен анализ данных за 29.09.15, 11.01.15, 08.03.15, 22.03.15 для часов, когда наблюдались СРС. Статистически значимых эффектов переотражения не выявлено.

1. Сравнение параметров шумановских резонансов в Томской области и на Алтае

Развитие магнитной станции «Байгазан» позволило провести исследование по сравнению параметров крайне-низкочастотного (КНЧ) электромагнитного фона на Алтае и в Томской области. Положение пунктов регистрации показано на рис.1. Магнитная станция «Коларово» (Томский университет) расположена в пригороде Томска на расстоянии 534 км от Байгазана. Сотрудники кафедры космической физики и экологии ТГУ занимаются исследованиями шумановских резонансов многие годы, осуществляя мониторинг их параметров с 1998 г. при помощи электрических антенн и при помощи индукционного магнитометра LEMI-30 в Коларово – с 2013 г. Целью работы было провести сравнительный анализ данных Коларово и Байгазана за 2015-18 гг., используя наработки ТГУ. При этом данные обрабатывались по единой методике, далее проводился статистический анализ амплитуд и частот первых трех мод ШР, сравнительный и корреляционный анализ полученных закономерностей.

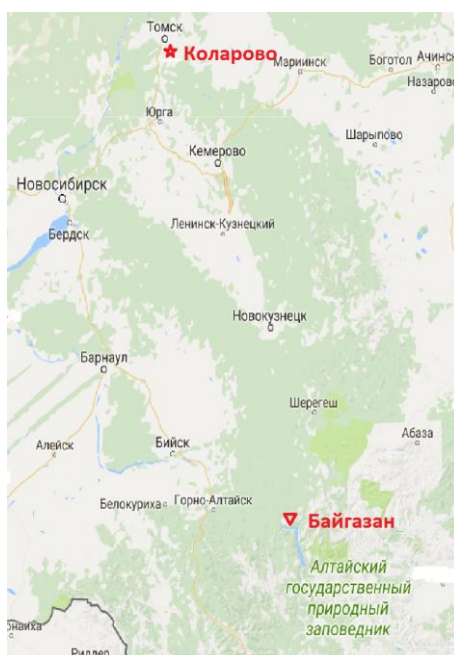


Рисунок 1 - Положение пунктов регистрации КНЧ электромагнитного фона.

Расстояние между пунктами 534 км.

Индукционный магнитометр LEMI-30 (производство Львовского Института космических исследований, Украина) расположен в вариационном павильоне и имеет три датчика, сориентированных вдоль X,Y,Z – компонент геомагнитного поля (см. рис.2). Характеристики магнитометра приведены в таблице 1.



Рисунок 2 – Измерительный павильон и оборудование на полигоне «Коларово» (56.34 С.Ш., 84.95 В.Д)

Таблица 1

Основные характеристики трехкомпонентного магнитометра LEMI-30

Частотный диапазон измеряемых сигналов	0.001 - 30 Гц
Коэффициент усиления системы	1,10,100,1000
Частота дискретизации в каждом канале	64, 128, 256 Гц
Разрядность АЦП	24 разряда
Подавление помехи 50 Гц	>60 дБ
Уровень магнитных шумов на частоте	$\leq 2 \text{ пТл} \times \text{Гц}^{-1/2}$
0.1 Гц	$\leq 0.2 \text{ пТл} \times \text{Гц}^{-1/2}$
1 Гц	$\leq 0.04 \text{ пТл} \times \text{Гц}^{-1/2}$
10 Гц	

На магнитной станции «Байгазан» использовался индукционный магнитометр разработки лаборатории робототехники ГАГУ на базе индукционных датчиков ИНТ-1, переданных ГАГУ Институтом солнечно-земной физики СО РАН [Учайкин, Кудин, Гвоздарев, 2015]. Основные характеристики прибора приведены в таблице 2.

Таблица 2

Основные характеристики трехкомпонентного магнитометра на базе датчиков
ИНТ-1

Частотный диапазон измеряемых сигналов	0.001 - 25 Гц
Частота дискретизации	100 Гц
Разрядность АЦП	24 разряда (AD7732)
Погрешность измерения	
Ниже 0.01 Гц	10 пТл
0.1 - 1 Гц	1 пТл
Более 5 Гц	0.1 пТл
Энергопотребление	10 Вт
GPS-синхронизация	Раз в сутки
Длительность автоматической записи на флеш-карту	3 месяца

Амплитудно-частотная характеристика магнитометра определялась экспериментально и показана на рис.3. Из нее видно, что максимум чувствительности соответствует частоте 8 Гц, а для второй и третьей гармоники необходимо пересчитывать амплитуды с коэффициентами 1.142 и 1.445 соответственно. Калибровка магнитометра путем сравнения его измерений со сглаженной конечной разностью измерений кварцевого вариометра показала, что в диапазоне частот ниже 1 Гц скорости измерения поля 1 нТл/с соответствует амплитуда сигнала 0.72 В. Перевод этой величины в диапазон

частот шумановских резонансов требует дополнительных исследований, поэтому результаты измерений ИНТ-1 приводятся ниже в относительных величинах (В).

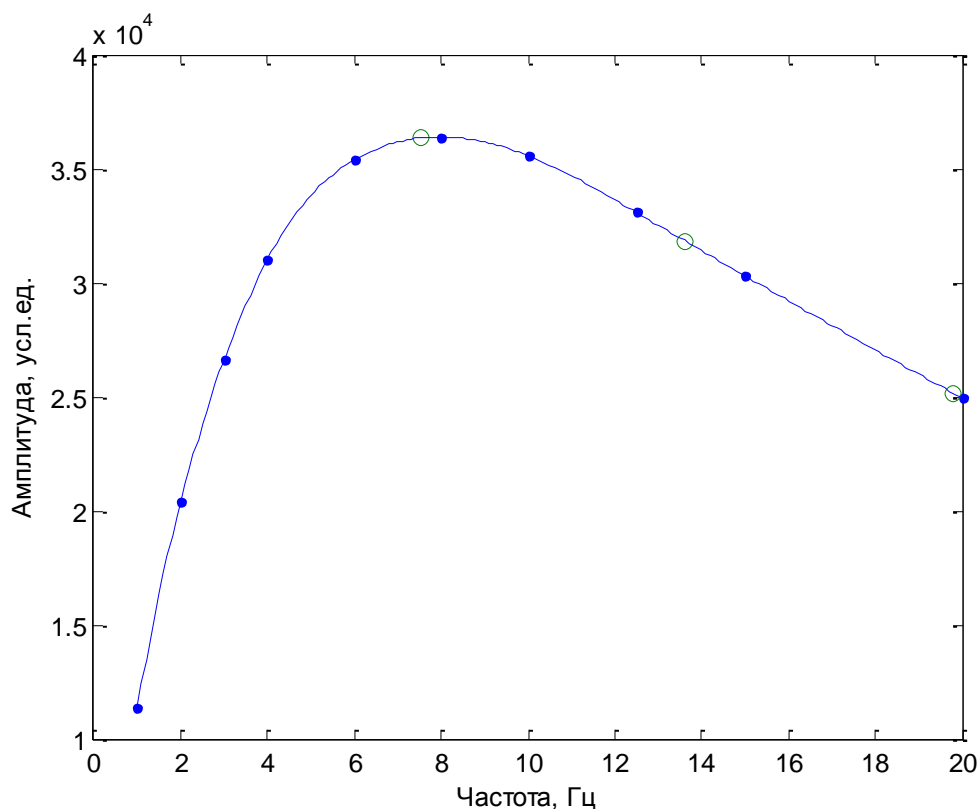
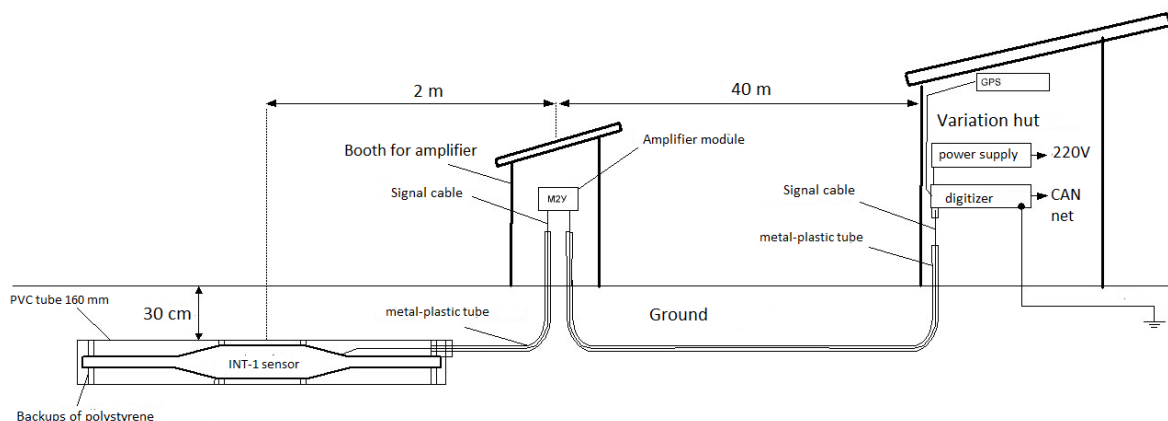


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика индукционного магнитометра ИНТ-1. Точками показаны результаты измерений. Кружками показаны значения АЧХ на средних частотах шумановских резонансов на Байгазане в 2016-2018 гг.

Установка индукционного магнитометра произведена на магнитоизмерительной станции Байгазан в 40 метрах севернее от магнитовариационного павильона (на пригорке) в ноябре 2014 г. (см рис.4). Датчики ИНТ-1 были помещены в герметичные трубы ПВХ диаметром 160мм, закрытые с торцов крышками. Положение пермалловых стержней фиксировалось пенополистироловыми вкладками, стыки крышек промазывались герметиком. По поверхности трубы намотали катушку из десяти витков для калибровки датчика. Датчики закопали в грунт на глубину 30 см с целью термоизоляции, один сориентировали вдоль меридиана, другой

вдоль широты. Сигнальный кабель катушки датчиков выведен в будку при помощи металлопластиковой трубы диаметром 20 мм и длиной 2 м.



а



б



в

Рисунок 4 - Установка индукционного магнитометра на основе датчика ИНТ-1 на магнитной станции «Байгазан»: схема (а), заглубление датчиков в землю (б), регистрационный блок (в).

Соединение с трубой ПВХ датчика выполнены при помощи герметичных сантехнических разъемов. Аналоговый сигнал усилителей передаются по кабелю состоящий из витых пар, который также был помещен металлопластиковую трубу и подведен к магнитовариационному павильону, где установлен регистратор индукционного магнитометра с подключенным к

нему блоком питания. Корпус магнитометра и металлопластиковая труба были заземлены. Измерения запустили 03.11.2014.

При помощи индукционных датчиков ИНТ-1 и LEMІ-30 осуществлялась цифровая регистрация двух ортогональных компонент магнитной индукции электромагнитного поля: B_x и B_y на Байгазане и в Коларово (частота дискретизации АЦП равна 100 и 128 Гц соответственно). Обработка данных проводилась по методике, принятой в Томском государственном университете [Колесник и др., 2016]. Для каждой компоненты поля во временном окне длительностью 10 с (спектральное разрешение равно 0,1 Гц) посредством дискретного преобразования Фурье рассчитываются амплитудные спектры $B_x(f)$ и $B_y(f)$:

$$B_x(f_n) = \sum_{k=0}^{N-1} B_x(t_k) e^{-i \frac{2\pi}{N} nk}, \quad (1)$$

где $B_x(t_k)$ – дискретизированный по времени сигнал в компоненте X; f_n – частота; n – номер спектральной гармоники ($n=0..N/2$); k – номер временного отсчета [$0.. N-1$] (соответствует интервалу – 10 секунд); $N=100$ Гц \times 10 с = 1000. При усреднении 15 последовательных спектров в неперекрывающихся окнах длиной 10 с рассчитывается спектр для 3-х минутного интервала, в результате для суток получается 480 оценок спектров. Обработка для компоненты B_y проводится аналогично.

Для определения резонансных характеристик первых трех мод шумановского резонанса (ШР) по амплитудным спектрам компонент B_x и B_y рассчитывался модуль горизонтальной компоненты B_{xy} :

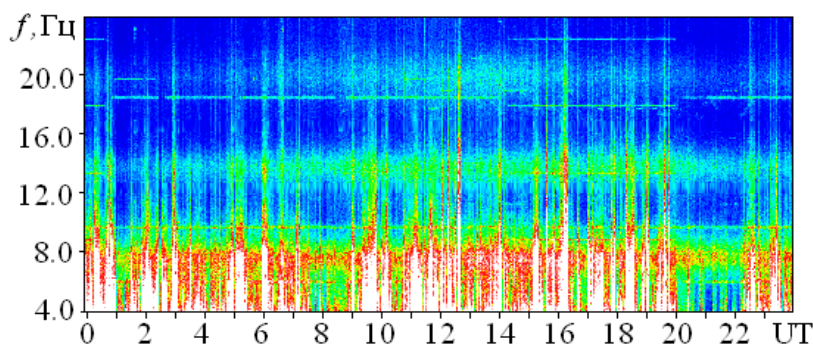
$$|B_{xy}(f_n)| = \sqrt{B_x^2(f_n) + B_y^2(f_n)}. \quad (2)$$

Алгоритм вычисления значений резонансных параметров (A_j , f_j , Q_j) первых трех мод ($j = 1..3$) состоял в следующем. Для каждой моды заранее были известны начальные средние значения резонансных частот (7.8; 14; 20 Гц). В частотном интервале $\pm 20\%$ от начального среднего значения резонансной частоты определялось значение частоты, соответствующее максимуму спектральной мощности. Это значение и являлось значением

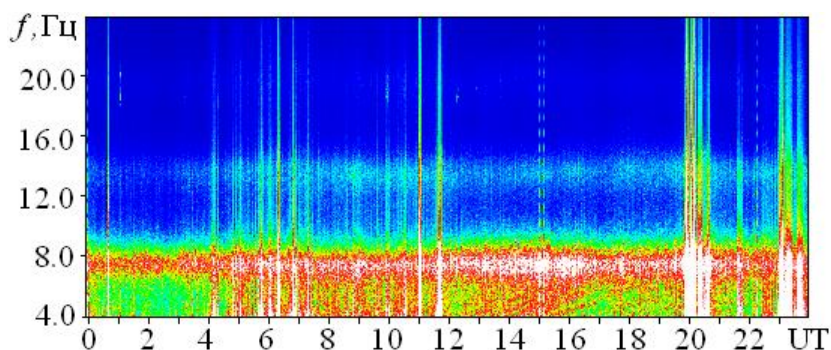
резонансной частоты f_j . Значение амплитуды резонансной моды соответствовало квадратному корню из максимального значения спектральной мощности. По экспериментальным данным значения добротности вычисляются согласно выражению:

$$Q_j = f_j / \Delta f_j, \quad (3)$$

где Δf_j – ширина резонансной моды на уровне половинной мощности (или $\sim 0,707A_j$), A_j – амплитуда, f_j – резонансная частота соответствующей моды ШР.



а

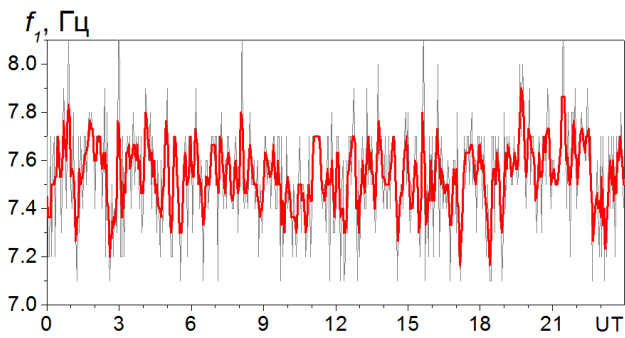


б

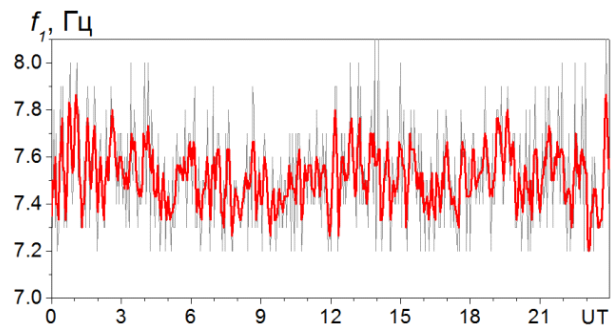
Рисунок 5 – Спектрограммы модуля магнитной индукции V_{xy} в полосе частот от 4 до 24 Гц 25/09/2016: а) Коларово, б) Байгазан.

В результате обработки данных за 2015-18 гг. были получены графики динамических спектров за этот период и оценки параметров ШР. На рисунке 5 ниже представлены примеры динамических спектров в Коларово и на Байгазане за 25.09.16 г. В целом картина схожа – наблюдаются три шумановских резонанса (ШР), кроме того, на графике для Байгазана заметны спектральные резонансные структуры в ночном секторе (после 12 UT). Картина спектров на Байгазане более ясная, содержит меньше шумов. Примеры

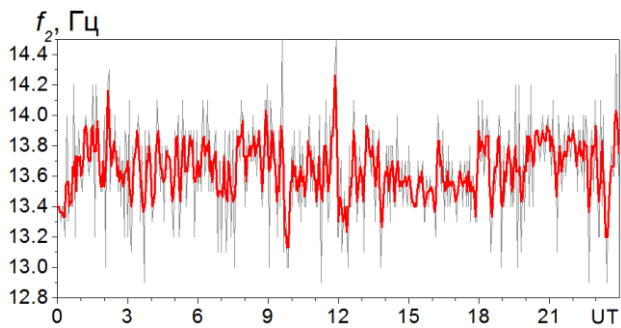
динамики параметров ШР в течение суток на Алтае и в Томской области показаны на рис.6-7. На графиках хорошо видна сильная изрезанность кривой вариации, видимо, вызванная локальными грозами или магнитными помехами.



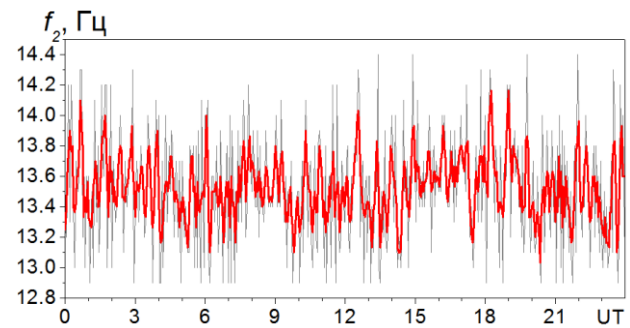
а



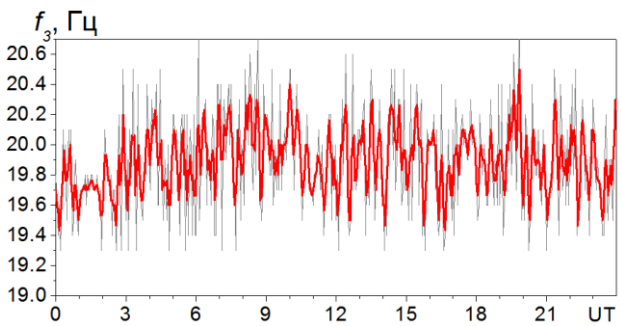
г



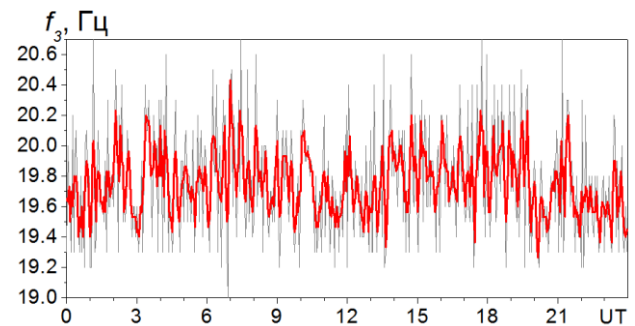
б



д

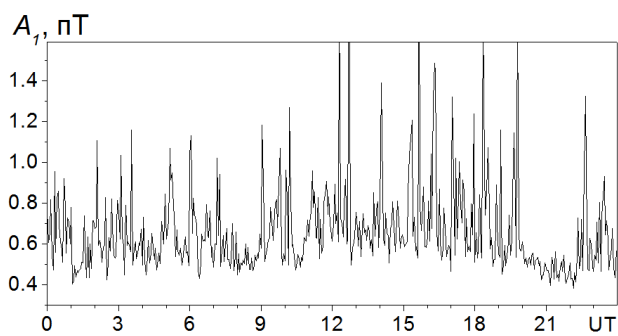


в

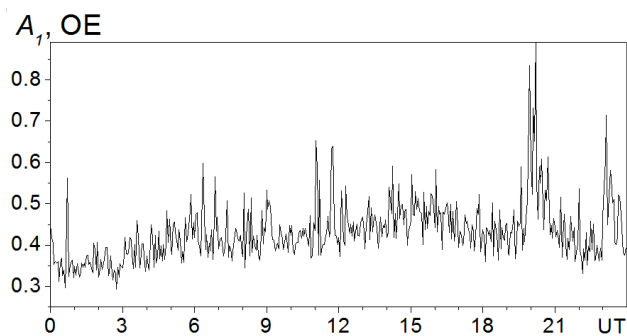


е

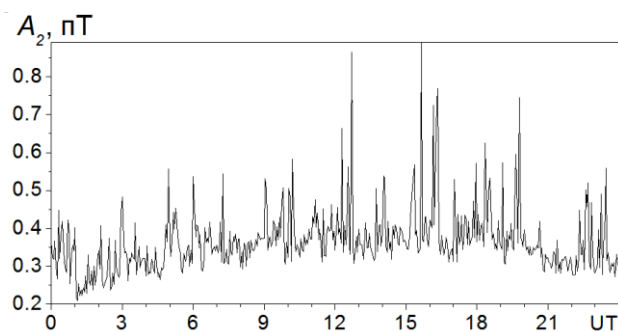
Рисунок 6 – Зависимости резонансных частот (f_1, f_2, f_3) первых трех мод от мирового времени для 25.09.2016 г. Коларово (а–в), Байгазан (г–е)



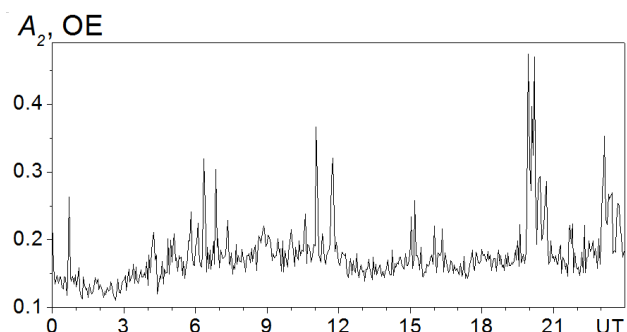
а



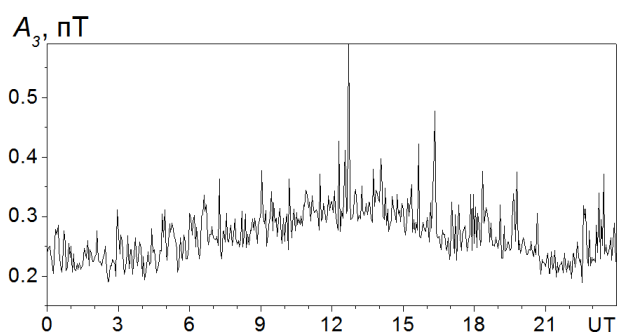
г



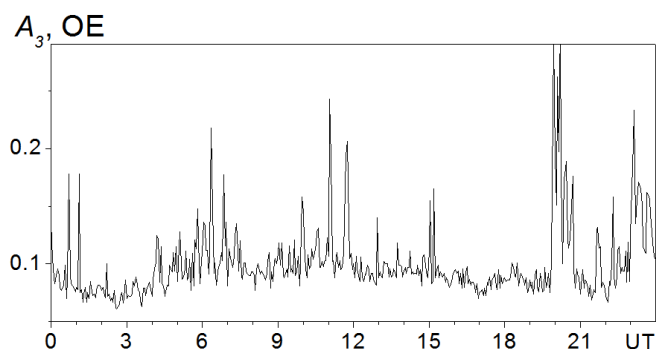
б



д



в



е

Рисунок 7 – Амплитудные значения первых трех мод в зависимости от мирового времени для 25.09.2016 г. Коларово (а–в), Байгазан (г–е)

По результатам таких суточных данных рассчитывались среднемесячные значения параметров ШР: частоты, амплитуды, добротности. Для амплитуд на обеих станциях наблюдался явно выраженный сезонный ход с максимумом в летние месяцы и минимумом – в зимние (см. рис.8). Такая зависимость обусловлена поведением глобальной грозовой активности (ГГА) – основного источника возбуждения резонатора Земля–ионосфера. В виду того, что планетарные очаги ГГА смещаются в летнее полушарие Земли, как следствие

происходит их приближение к местам наших совместных измерений (Западная Сибирь) в период июнь–август. Это приводит к росту уровня магнитной индукции в широкой полосе частот, также увеличиваются и амплитудные значения мод ШР. Важным дополнительным фактором, имеющим нерегулярный характер, является локальная грозовая активность, параметры которой отличны на Алтае и в Томской области, но наибольшая активность местных гроз и тут и там отмечается летом.

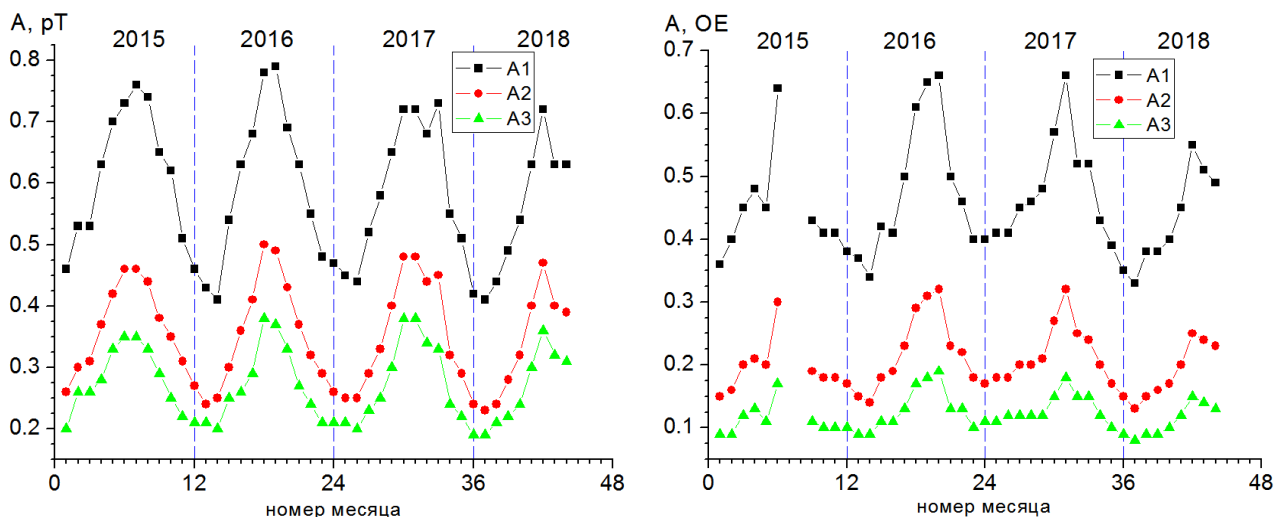


Рисунок 8 – Сезонный ход амплитуд первых трех мод ШР в Коларово (а), Байгазан (б) в 2015-18 гг.

В обоих разнесенных измерительных пунктах наблюдается выраженная годовая периодичность вариаций среднемесячных значений амплитуд для всех трех мод ШР. Минимальные значения амплитуд приходятся на зимний период (преимущественно на январь–февраль). Летние максимумы на Алтае несколько отличаются от томских, что объясняется различиями в характерах местной грозовой активности вблизи измерительных пунктов [*Kolesnik, Kolmakov, Tsyura, 2018*].

За весь период выполнения проекта, начиная с 2016 года по 2018 год, были рассчитаны средние значения добротностей, резонансных частот и амплитуд первых трех мод шумановских резонансов (см. табл.3-5). Для Байгазана по сравнению с Томском характерны несколько меньшие значения

резонансных частот (у второй моды до ~ 0.2 Гц) и более высокие значения добротностей всех трех мод (до $\sim 30\%$).

Таблица 3

Средние частоты шумановских резонансов по наблюдениям 2016-18 г.

Частоты, Гц	Коларово (Томск)	Байгазан (Алтай)
f_1	7.5310 ± 0.0003	7.5053 ± 0.0003
f_2	13.8083 ± 0.0004	13.6089 ± 0.0005
f_3	19.9739 ± 0.0005	19.7993 ± 0.0005

Таблица 4

Средние значения добротности шумановских резонансов по наблюдениям 2016-18 г.

Добротности	Коларово (Томск)	Байгазан (Алтай)
Q_1	5.491 ± 0.002	6.883 ± 0.004
Q_2	7.942 ± 0.003	10.042 ± 0.006
Q_3	10.373 ± 0.007	13.451 ± 0.010

Таблица 5

Средние значения амплитуд первых трех мод шумановских резонансов по наблюдениям 2016-18 гг. В скобках указаны отношения амплитуд второй и третьей гармоник к величине первой

Амплитуды	Коларово (Томск), пГл	Байгазан (Алтай), о.е.
A_1	0.5819 ± 0.0003	0.4589 ± 0.0003
A_2	0.3474 ± 0.0002 (0.5970)	0.2352 ± 0.0002 (0.5125)
A_3	0.2682 ± 0.0001 (0.4609)	0.1759 ± 0.0002 (0.3833)

Регрессионная зависимость между амплитудными значениями мод ШР на Алтае и в Томском регионе имеет простой линейный вид. Например, для среднемесячных значений амплитуд второй моды ШР в Коларово и Байгазане величина статистической значимости R^2 , определяемая по критерию Фишера составила 0.89. Для коротких рядов (из 42 значений) такой высокий

коэффициент определенности R^2 , при среднеквадратической ошибке $SD=0.02$, свидетельствует о высокой степени линейной статистической сопряженности вариаций рассматриваемых параметров. Аналогично для первой моды ШР: $R^2=0.87$, $SD=0.04$. Для третьей моды ШР: 0.86 и 0.01 – соответственно

Вычисленные коэффициенты корреляции между рядами значений частот и амплитуд на Алтае и в Томской области приведены в таблице 5, из которой видно, что для всех трех мод динамика резонансных параметров ШР (частот в двух измерительных пунктах и соответственно амплитуд) сильно статистически связана ($r>0.7$).

Таблица 5

Коэффициенты корреляции между параметрами ШР на Байгазане и в Томске по данным за период с января 2015 г. по август 2018 г.

	1 мода		2 мода		3 мода	
	частоты	амплитуды	частоты	амплитуды	частоты	амплитуды
Коэффициенты корреляции	0.83	0.87	0.87	0.89	0.72	0.86

Сезонный ход резонансных частот для каждой из мод ШР строго индивидуален. У второй моды хорошо проявлена годовая волна с максимальными значениями в зимний период (декабрь–февраль), и минимальными – в летний (рисунок 9 б), у третьей – полугодовая с максимумами в мае и октябре-ноябре и минимумами в марте и июле (рисунок 9 в).

Для первой моды ШР значения резонансных частот в Томске и на Алтае оказались ближе друг к другу, чем резонансные частоты второй и третьей мод. Для первой резонансной частоты минимумы приходятся на март–апрель, максимумы – на май, октябрь. В целом за период с 2015 по 2018 год наблюдается нисходящий тренд (частоты уменьшаются) в обоих измерительных пунктах (рисунок 9 а).

Характер полученных сезонных изменений для всех трех резонансных частот ($f_1 - f_3$) в Томске и на Байгазане весьма схож, однако значения резонансных частот в среднем на Байгазане ниже. Экстремумы резонансных

частот (максимумы и минимумы в сезонном ходе) наблюдаются практически синхронно в одни и те же месяцы. Исключением может считаться частота третьей моды ШР по данным измерений в первой половине 2015 года. Указанный момент пока не нашел четкого объяснения и потребует в дальнейшем дополнительного исследования.

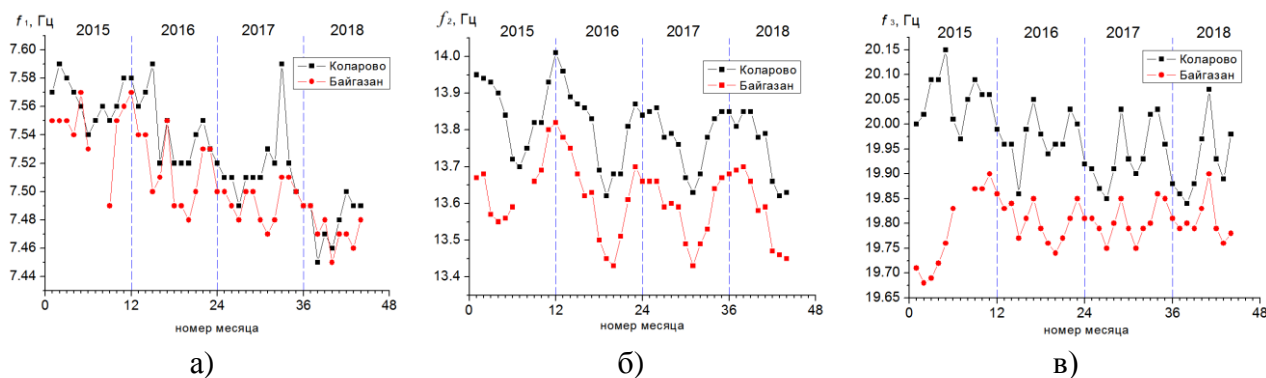


Рисунок 9 – Сезонный ход резонансных частот трех мод ШР в Коларово и Байгазане за период с 2015 г. по 2018 г.

Кроме выраженных сезонных вариаций имеют место вариации резонансных параметров с масштабами порядка суток и менее (12 часов, 8 часов и т.д.). Сезонно-суточное распределение амплитуд (A_1 , A_2 , A_3) первых трех мод на Алтае представлено на рисунке 10, здесь месяц с номером 1 – январь 2015. Пунктирными вертикальными линиями разделены годовые интервалы.

Максимальные значения амплитуд всех трех мод приходятся на 08–09 UT (15–16 LT) в летний период (июль–август). Минимальные значения имеют место в зимний период (январь–февраль) в 17–02 UT (02–09 LT).

Амплитуды мод ШР определяются электродинамическими свойствами глобального резонатора Земля-ионосфера, а так же пространственно-временным распределением грозových разрядов на планете, которые имеют сезонную и суточную изменчивость [3]. На нашей планете существуют три основных глобальных центра гроз: африканский, азиатский и американский центры грозовой активности. Максимум активности азиатского грозowego центра соответствует ~9–10 UT. Активность африканского центр грозовой

активности достигает своего максимума, приблизительно в 14–15 UT. Во временном интервале ~20–23 UT активизируется американский центр.

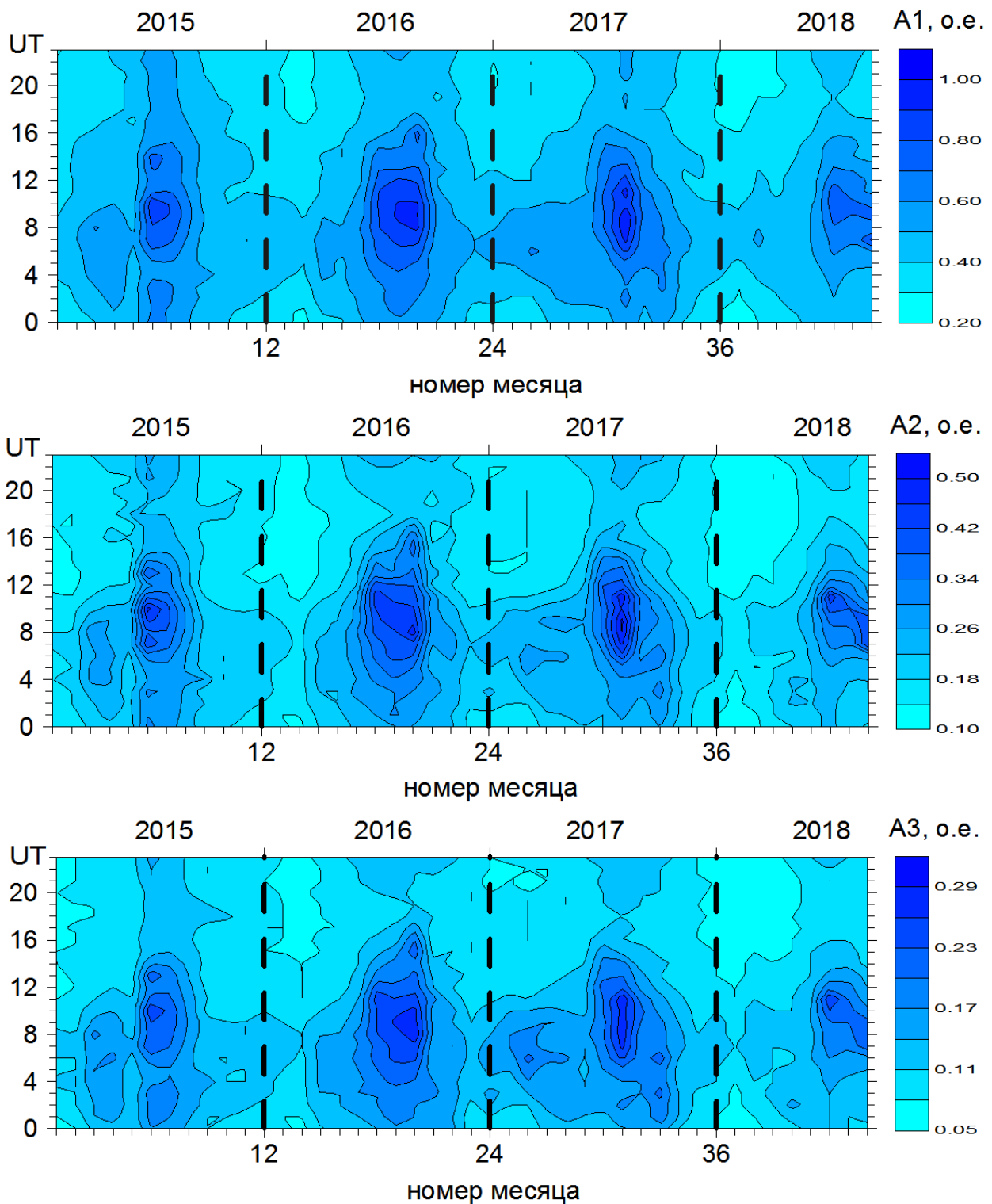


Рисунок 10 – Сезонно-суточные распределения амплитуд первых трех мод ШР на Байгазане за период с 2015 г. по 2018 г.

Исходя из полученных сезонно–суточных распределений за весь период наблюдений (2015–2018 гг.), наибольшее влияние на амплитуды первых трех мод ШР в сибирском регионе и на Алтае оказывает мировой грозовой центр, расположенный в Юго-Восточной Азии (~09 UT). В ~00 UT отмечено влияние американского грозового центра. Влияние африканского центра грозовой активности оказалось относительно слабым. Устойчивая годовая повторяемость сезонно-суточных распределений амплитуд трех мод ШР от года к году указывает на высокую стабильность электродинамических характеристик резонатора Земля–ионосфера и источников его возбуждения.

На рисунке 11 приведено сезонно-суточное распределение частот трех мод ШР на Байгазане за четырехлетний период. Для частоты первой моды ШР в сезонно-суточном ходе локальные минимумы наблюдаются: 1) в марте в ~08 UT и ~18–20 UT, 2) июле–августе в ~08 UT. Локальные максимумы регулярно присутствуют: 1) в феврале в ~13 UT, 2) апреле–мае в ~13 UT и ~20 UT и 3) декабре в 13–15 UT. В целом не смотря на то, что экстремумы год от года сохраняют свою привязку ко времени, имеет место общее среднее уменьшение частоты первой моды на всем интервале наблюдений.

У второй моды резонансная частота в среднем также претерпевала уменьшение на всем интервале наблюдений, но менее значительное, чем частоты первой моды. Положение локальных экстремумов (время их появления в зависимости от мирового времени и сезона года) отличается от поведения f_1 и f_3 . Так в сезонно-суточном ходе локальные минимумы наблюдаются: 1) в июле–августе в 09–10 UT, 2) феврале ~04 UT. Локальные максимумы регулярно присутствуют в декабре–январе в ~00 UT и ~17 UT.

Для частоты третьей моды ШР в сезонно-суточном ходе локальные минимумы наблюдаются: 1) в январе-марте в 05–06 UT, 2) апреле ~22 UT и 3) июле в ~10 UT. Локальные максимумы регулярно присутствуют: 1) в апреле в ~19 UT, 2) мае в 04–07 UT, 3) октябре ~19–20 UT и 4) ноябре–декабре в ~14 UT. В целом не смотря на то, что экстремумы год от года сохраняют свою привязку

ко времени, имеет место рост величины майских максимумов частоты третьей моды и одновременное уменьшение августовских минимумов этого параметра.

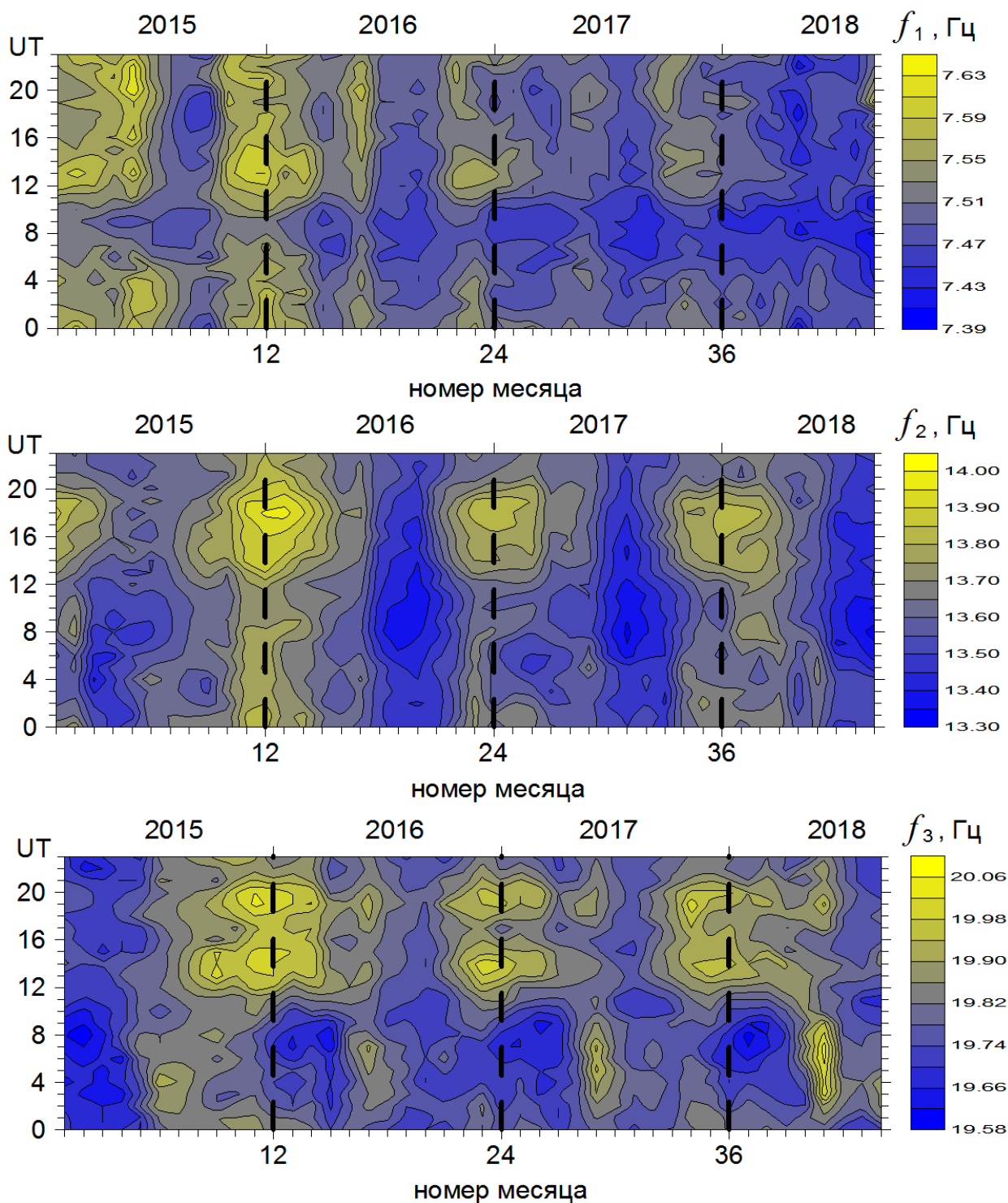


Рисунок 11 – Сезонно-суточные распределения резонансных частот первых трех мод ШР на Байгазане за период с 2015 г. по 2018 г.

Подобное разнонаправленное изменение частот мод ШР обусловлено 11-летней изменчивостью нижней ионосферы, контролируемой солнечной активностью [Kolmakov, Tsyura, 2018].

Для трех резонансных частот по данным измерений в Томске распределения от года к году сохраняет устойчивый вид. Экстремальные значения f_2 в Томске характеризуются максимальными значениями ($\sim 14,1$ Гц) в декабре-январе ~ 19 UT. Резонансная частота f_2 имеет минимальные значения ($\sim 13,6$ Гц) в летние месяцы (июль–август) в ~ 11 – 12 UT. Значения f_1 в январе 2013 г. наоборот близки к минимальным ($\sim 7,5$ Гц), максимум ($\sim 7,8$ Гц) прослеживается в летний период в ~ 18 – 21 UT. В свою очередь, экстремальные значения f_3 характеризуются максимальными значениями ($\sim 20,5$ Гц) в мае в ~ 04 – 08 UT, а так же в период с октября по ноябрь в ~ 18 – 20 UT.

Привлеченные для контроля данные, полученные в Томске, позволили оценить отличия в сезонно-суточных распределениях резонансных частот в двух измерительных пунктах. В качестве оценочных значений были выбраны разности частот трех мод ШР:

$$\Delta f_i = f_i^T - f_i^A,$$

где индекс $i = 1, 2, 3$ – соответствует номеру моды ШР, f_i^T – резонансные частоты мод ШР в Томске, а f_i^A – резонансные частоты мод ШР на Алтае. Распределения приведены на рисунке 12.

В отличие от сезонно-суточных распределений резонансных частот у всех трех первых мод ШР разностные значения Δf_i имеют строго выраженный нерегулярный вид (рисунок 12) – большинство отклонений не повторяются от года к году. Однако присутствуют локальные экстремумы, носящие периодический характер. Так для Δf_1 имеет место экстремум, приходящийся на сентябрь в ~ 19 – 20 UT.

У Δf_2 отмечены экстремумы в феврале–марте в ~ 08 UT и октябре 02 – 04 UT. Аналогично для Δf_3 отмечены экстремумы в октябре ~ 02 UT, ~ 06 UT и ~ 10 UT. Для Δf_1 размах вариаций не превысил $\pm 0,14$ Гц. Для Δf_2 и Δf_3 отклонения получились преимущественно положительными в виду того, что резонансные частоты в Томске выше, чем на Алтае. Размах отклонений Δf_2 и Δf_3 оказался

достаточно близок и составил ~ 0.5 Гц, что не превысило 3.4 % и 2.5% соответственно.

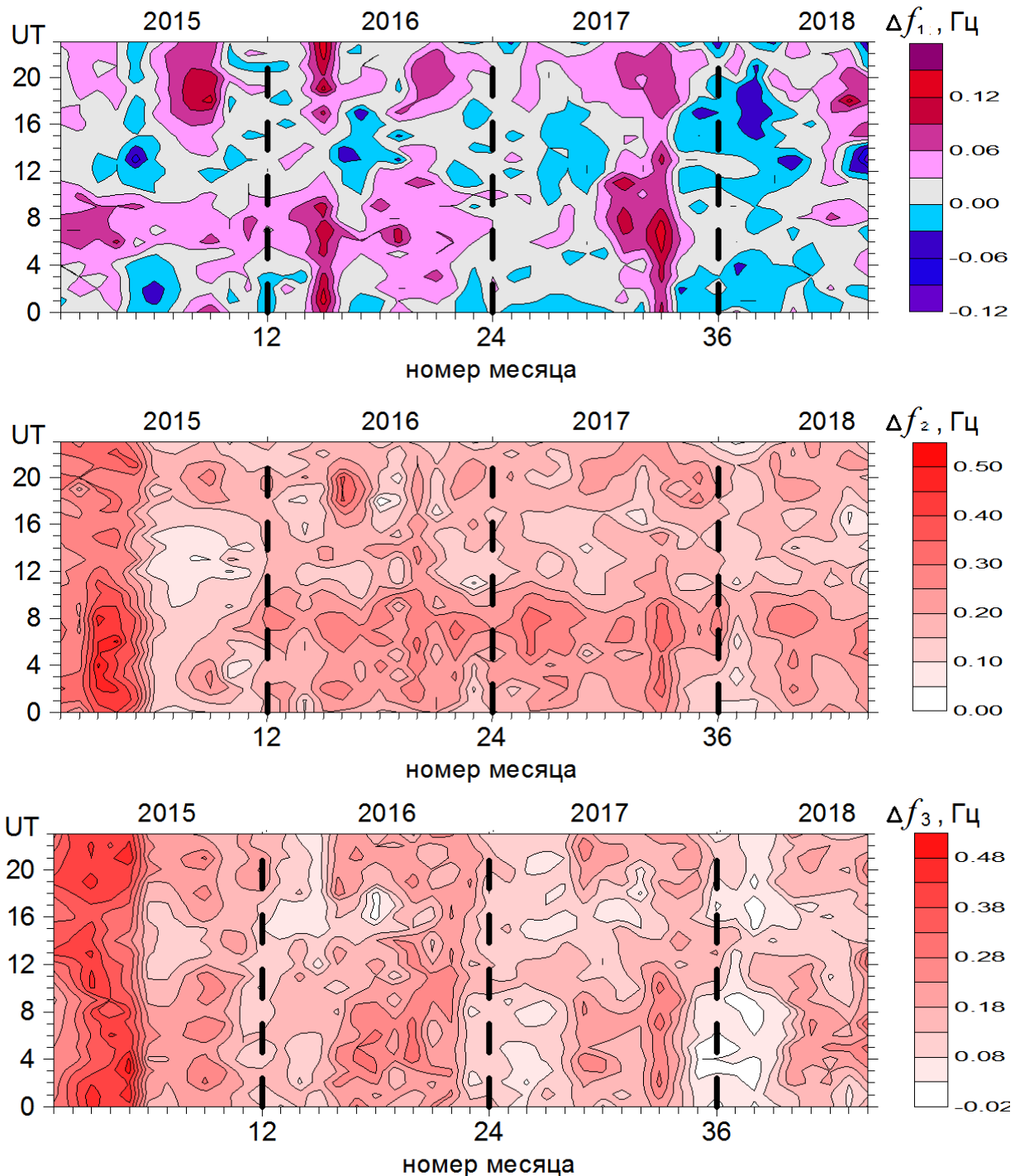


Рисунок 12 – Сезонно-суточные распределения разности резонансных частот первых трех мод ШР в Томске и на Байгазане за период с 2015 г. по 2018 г.

В целом за все время выполнения проекта наблюдалось хорошее качественное и количественное совпадение динамики спектральных

параметров (амплитуд и резонансных частот резонатора Земля-ионосфера на Горном Алтае и в Коларово).

Выявлены региональные особенности поведения резонансных частот шумановских резонансов. Резонансные частоты на Горном Алтае оказались в среднем ниже, чем в Коларово (Томская область) для всех трех мод ШР.

Разностные значения резонансных частот на Горном Алтае и в Томске имеют периодические составляющие, связанные с отличием электродинамических процессов формирования КНЧ-фона в резонаторе Земля-ионосфера в двух измерительных пунктах и случайные отклонения, обусловленные более высоким уровнем техногенных шумов в окрестностях Томска, в месте расположения измерительного оборудования ТГУ.

2. Разработка индукционного магнитометра для пункта регистрации «Бичикту Бом»

Кафедрой космической физики и экологии Томского государственного университета были переданы три индукционных датчика SCAT M-120 (Нижний Новгород). Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики датчиков представлены на рис.13. Из графиков видно, что датчики предназначены для регистрации электромагнитного фона в полосе частот от 2 Гц до 2 кГц и могут быть использованы для регистрации спектральных резонансных структур в полосе частот альфвеновского ионосферного резонатора и шумановских резонансов. Регистрация микропульсаций геомагнитного поля при их помощи затруднительна. Тем не менее, для выполнения текущего проекта данные датчики вполне пригодны.

На основе переданных датчиков сотрудниками лаборатории робототехники ГАГУ был разработан магнитометр, структурная схема которого представлена на рис.14. Напряжение аналогового выхода датчика усиливается при помощи усилителя, оцифровывается блоком регистрации и записывается во флеш-карту памяти.

Время регистрации данных синхронизируется по GPS-приемнику. Кроме данных о выходном напряжении датчика записывается следующая информация:

- время регистрации с отсчетной точностью 1 мс;
- температура в датчике, усилителе и блоке регистрации.

К блоку регистрации создано программное обеспечение, формирующее данные в текстовый файл определенного формата для их дальнейшего анализа.

Магнитометр обладает следующими техническими характеристиками:

- Динамический диапазон измерения вариаций магнитного поля ± 10 нТл
- Погрешность по каналу магнитного поля не ниже 5 пТл на частоте 2 Гц.
- Чувствительность по температурным каналам не ниже 0.1С
- Диапазон измерения температуры от -40 до +40С

- Точность синхронизации по GPS не менее 1 мс
- Частота выполнения привязки времени - раз в сутки
- Емкость карты памяти не ниже 8 Гб
- Продолжительность автономной записи данных - 3 месяца

- Частота опроса канала магнитного поля 100 Гц
- Разрядность АЦП не ниже 22
- Энергопотребление не более 10 Вт
- Напряжение питания 12 В.

Магнитометр состоит из двух плат, изготовленных в отдельных корпусах, предполагающих возможность их быстрой смены: платы усиления и платы управления и записи (см. блок схему на рис.9)

Плата оцифровки содержит:

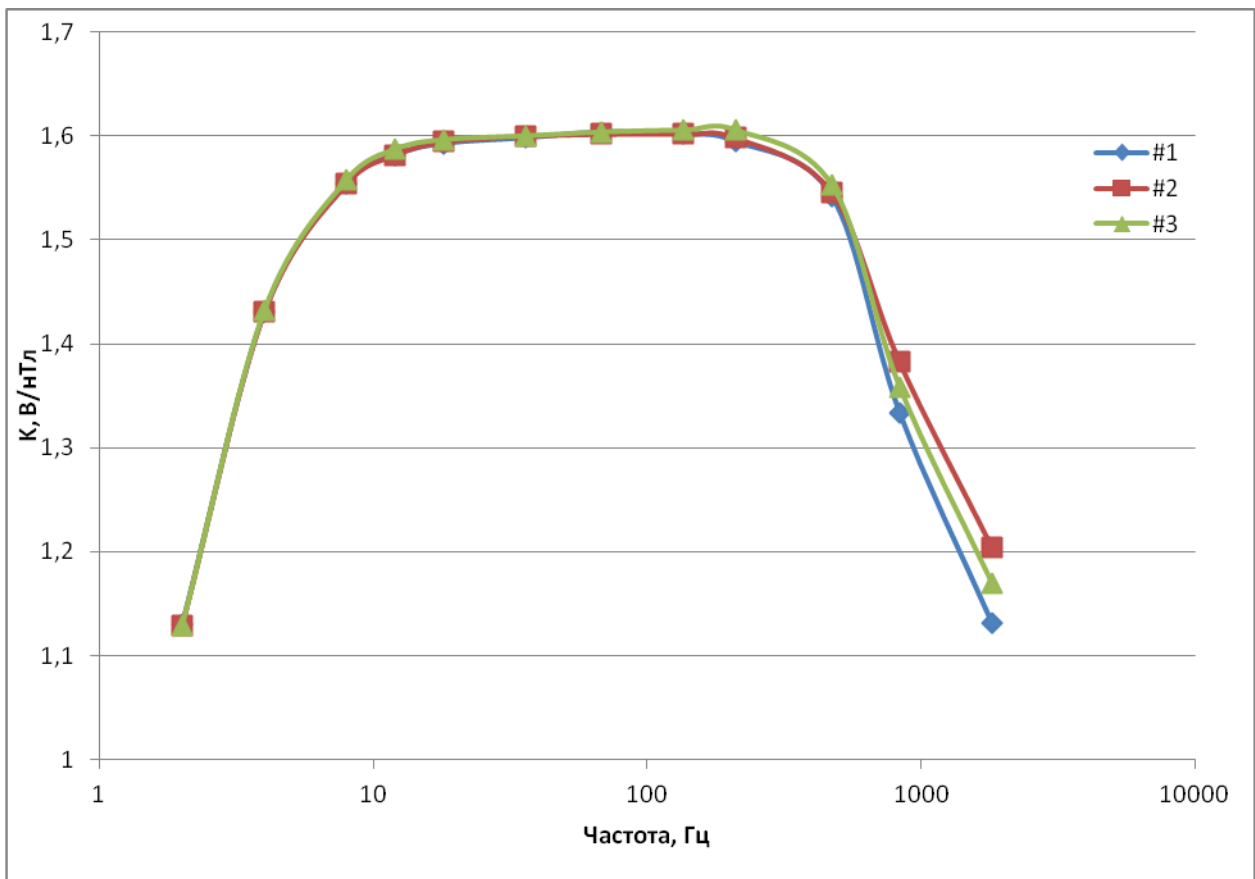
- 1) - 24-разрядное АЦП;
- 2) – источник опорного напряжения;
- 3) – магнитный изолятор;

Плата управления и записи содержит:

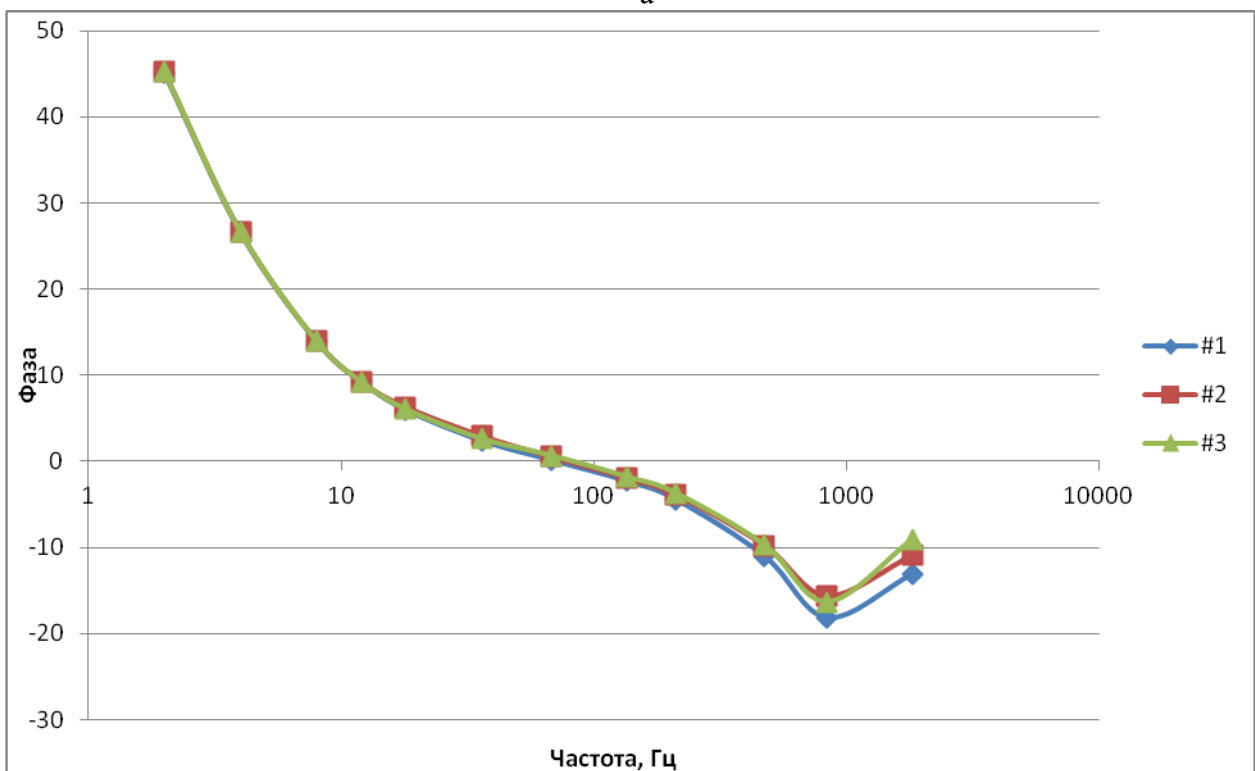
- 1) - 16-разрядный контроллер;
- 2) - внешний таймер;
- 3) - флеш-карту памяти с устройством записи;
- 4) - внутренний термодатчик с интерфейсом;
- 5) - вход GPS;

Блок питания двуполярный.

Платы записи в активном режиме производят оцифровку сигнала с датчика SCAT M-120, запись результатов измерений в ОЗУ. В неактивном режиме производится перезапись результатов измерений из быстрой памяти на флеш-карту.



а



б

Рисунок 13. Амплитудно- (а) и фазо-частотная (б) характеристика датчиков SCAT

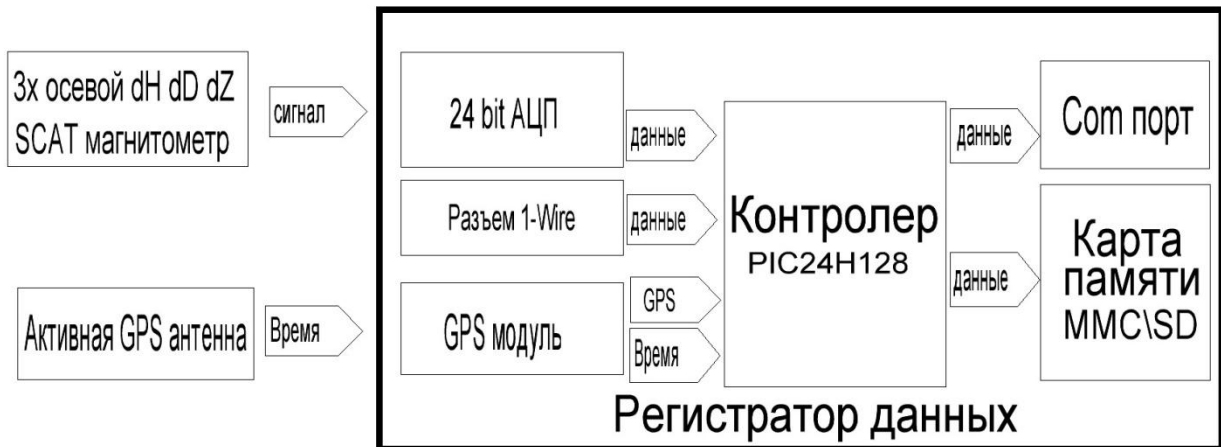


Рисунок 14. Блок схема регистратора.

Плата управления осуществляет переключение режимов записи у плат записи, контроль работоспособности плат записи, снимает сигнал времени с GPS-приемника и синхронизирует таймеры плат записи по этому сигналу. При отсутствии сигнала с GPS-приемника время отсчитывается по внутреннему таймеру.

3. Создание пункта регистрации КНЧ электромагнитного фона в окрестностях с. Бичикту Бом

Согласно плану проекта планировалось создать второй пункт регистрации на основе индукционного магнитометра в 150 км южнее Байгазана – предположительно в районе Курая. Однако в начале 2017 года руководителю проекта поступило предложение создать магнитную станцию на территории национального парка «Уч Энмек» в районе полеводческой стоянки между селами Бичикту Бом и Боочи (см. рис.15) в 152 км к юго-западу от Байгазана. Сотрудников ГАГУ связывает с парком многолетнее сотрудничество [Комплексное ..., 2013], что рассматривалось как положительный фактор для стабильной работы станции.

С этой целью в окрестностях предполагаемой станции была сделана магнитная съемка на площади около 4 кв.км. Полевые магниторазведочные работы 11.06.2017г. - 05.11.2017 г. были проведены при помощи пешеходного мобильного магнитометра MMPOS-1 на основе процессорного оверхаузеровского датчика POS-1 #285 (производство лаборатории квантовой магнитометрии Уральского федерального университета), принадлежащего лаборатории геофизики Горно-Алтайского государственного университета.

Систематическая погрешность прибора ($+0.34 \pm 0.04$ нТл) была определена во время семинара-совещания по сверке абсолютных магнитометров обсерваторий Урала, Сибири и Дальнего Востока 20-22 сентября 2017 г. в геофизической обсерватории «Арти». В это же время была произведена поверка прибора у производителя.

При работе использовалась возможность площадной съемки в «режиме прогулки» с фиксацией координат по GPS: при этом магнитометрист перемещается по маршруту, а прибор автоматически производит измерения с периодом 5 сек, координаты замеров и результаты измерений пишутся в память регистратора магнитометра. Расстояние между маршрутами во время съёмки задавалось около 200 м. При движении по маршруту магнитометрист контролировал свое движение по GPS.

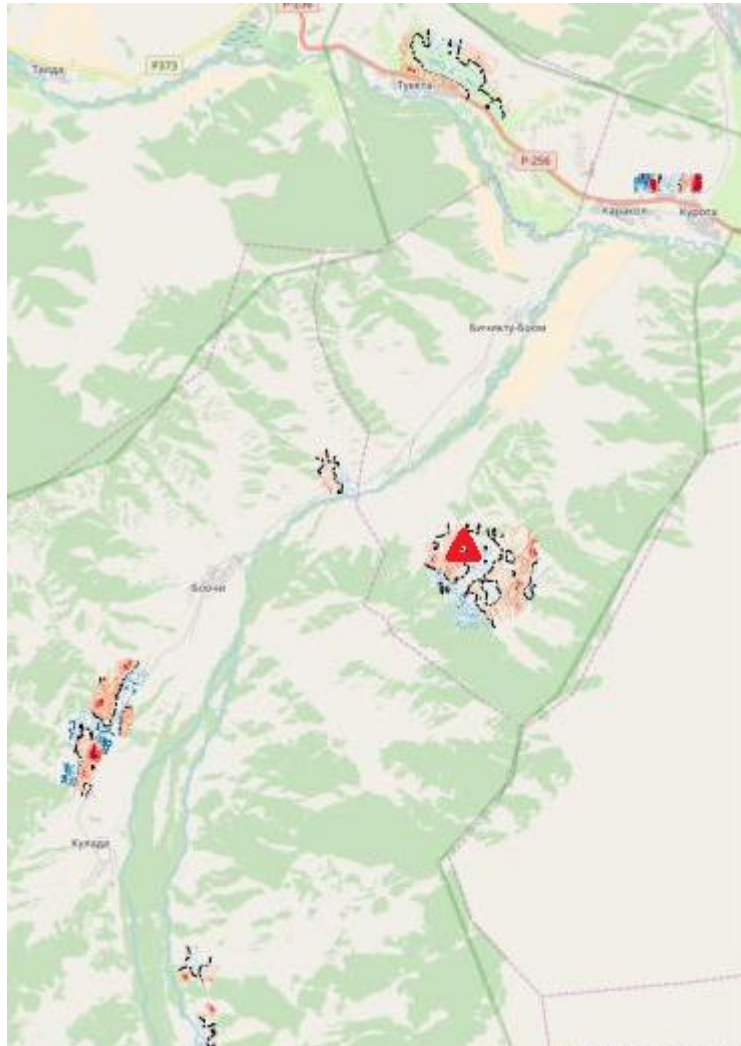


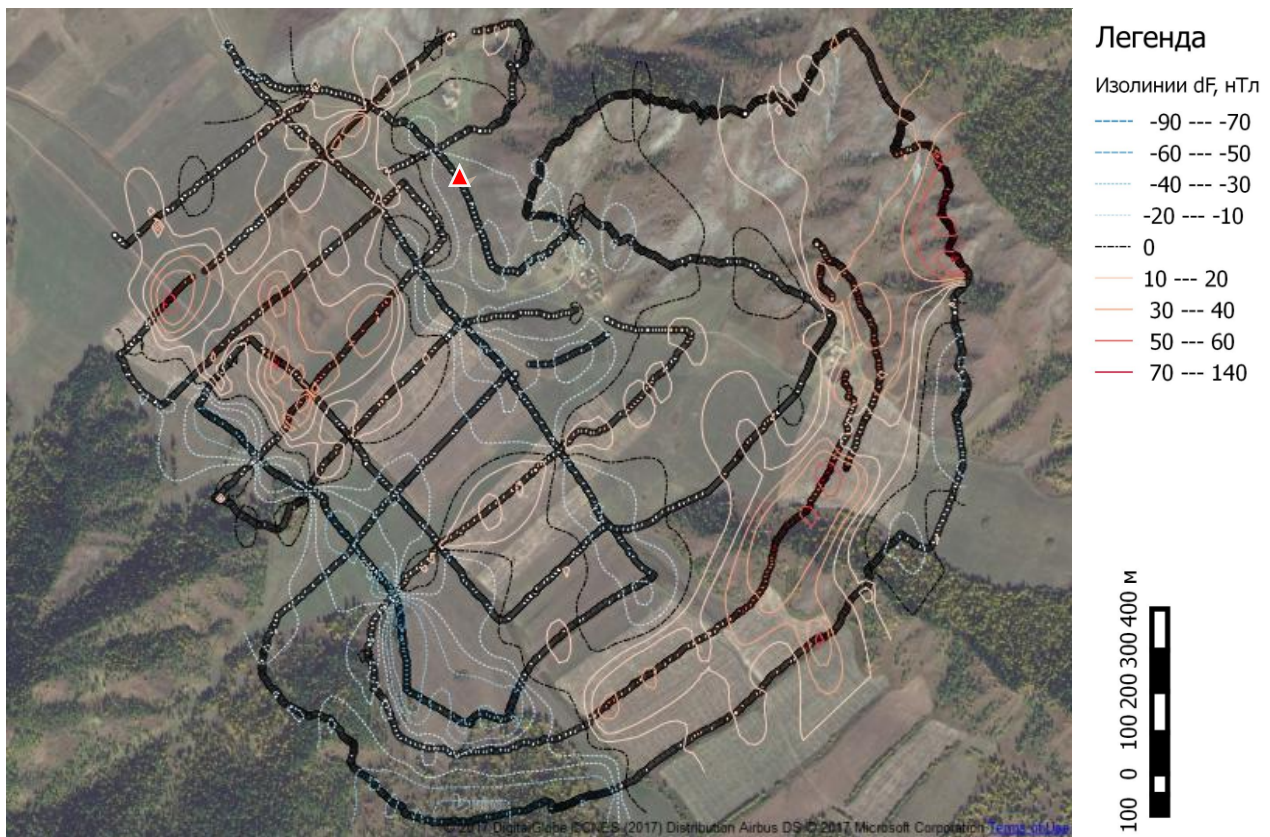
Рисунок 15 – Положение нового пункта регистрации (показан красным треугольником) в долине Каракола. Цветом в красно-синей гамме показаны результаты магнитных съёмок в долине Каракола в рамках нашего проекта и проекта по изучению магнитных полей археологических объектов [Комплексное..., 2013].

Результат съёмки представлен на рисунке 16. Как видно из него, поле в окрестностях станции довольно однородно. На довольно большой площади (в круге радиусом около 1 км) поле меняется на 180 нТл, что для горных условий можно считать слабовозмущенным полем. Из карты видно, что возмущения представляют собой две субмеридиональные аномалии на въезде в котловину и в дальней её части, наиболее сильные аномалии связаны с хребтом. Склон

хребта, примыкающий к котловине с юга, характеризуется пониженными значениями поля.



а



б

Рисунок 16 – Фото района съёмки (а) и распределение магнитного поля в окрестностях предполагаемой станции (б). Показаны маршруты измерений и изолинии поля через 10 нТл.

Пункт регистрации установили в окрестности нулевой изолинии, в области довольно слабых градиентов поля, что, видимо, обеспечивается довольно толстым слоем четвертичных отложений и слабой магнитностью пород, слагающих близлежащие скалы. В целом долина р.Каракол характеризуется отсутствием сильных магнитных аномалий, так как породы, слагающие долину (живетский и франкский ярус девона), относятся к слабомагнитным и немагнитным.

Была также сделана детальная съемка территории, непосредственно прилегающей к пункту регистрации. Распределение поля в окрестности пункта регистрации показано на рис.17.

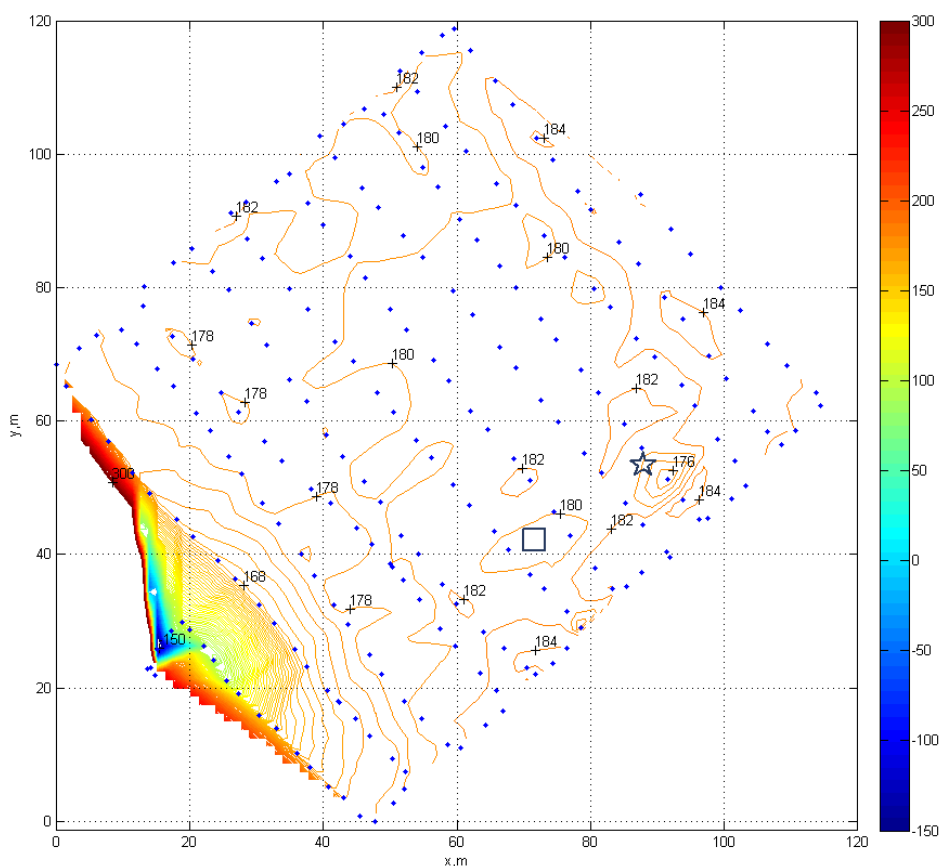


Рисунок 17 – Распределение модуля магнитного поля в окрестности пункта регистрации. Точками показаны места замеров при площадной съемке, квадратом - положение блока электроники, звездой - положение датчиков.

Изолинии модуля поля проведены через 2 нТл.

Как видно из него, поле на площадке характеризуется очень малым градиентом. Значительные аномалии в юго-западной части карты-схемы связаны с железобетонным столбом электропередач, идущего к стоянке и автомобилем ее владельца.



Рисунок 18 – Внешний вид и положение пункта регистрации относительно дома стоянки А.Мамыева

На площадке в окрестностях скотоводческой стоянки в 7 км от с. Бичикту Бом был организован пункт регистрации геомагнитных вариаций и КНЧ электромагнитного фона. На пункте наблюдения был установлен индукционный магнитометр разработки ГАГУ на основе датчика SCAT M –120 (НИРФИ, Н. Новгород). Датчики были помещены в пластиковые трубы и закопаны в землю на глубину 30 см с ориентацией "север-юг" и "запад-восток". Стыки труб и торцевых крышек обрабатывались силиконом. Питающий и информационный кабели внутри металлопластиковой трубы и выводились к ящику, содержащему усилитель и регистратор. Питание осуществлялось от расположенного в 100 м дома (стоянка на выпасе), к которому подведена стационарная линия электропередач 10 кВ. Питающий кабель прокладывался в металлопластиковой трубе и закапывался на глубину около 10 см. Предварительный анализ данных показал, что датчики регистрируют первые два шумановских резонанса (8, 14 Гц), однако сигнал довольно сильно зашумлен.

Первый год регистрации был неудачным. Скот владельца стоянки продавил трубы, в которые были уложены датчики. Флеш-карта, на которую писались данные, в условиях низких температур (до -50) быстро затерлась, поэтому от первого года регистрации сохранилось очень ограниченное количество данных. Поэтому работа по установке станции была проведена заново, с покрытием датчиков досками поверх слоя земли и установкой вокруг них ограды из дерева, сбитой немагнитными гвоздями. Владельцу стоянки был выделен нетбук, на который он раз в неделю сбрасывал данные. Эпизодически данные передавались в ГАГУ. Такая схема организации позволила обеспечить сохранность данных, однако в январе 2019 г. станция опять вышла из строя.

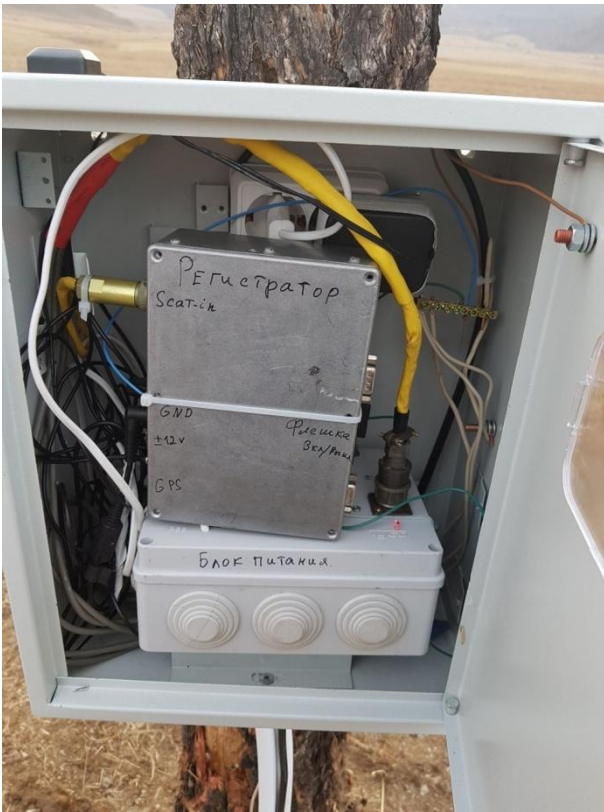


Рисунок 19 - Иллюстрации к процедуре установки индукционного магнитометра

4. Исследование спектральных резонансных структур в полосе частот ионосферного альфвеновского волновода

В последнее время значительный объём научных публикаций посвящён исследованию спектральных резонансных структур (СРС) геомагнитных вариаций. При этом существует два теоретических подхода к объяснению этого явления: как резонансам ионосферного альфвеновского волновода [Belyaev et al., 1990] либо как результатам интерференции отражённых от нижней и верхней границ ионосферы волн от грозových разрядов [Fedorov et al, 2014].

В 2014 на магнитной станции "Байгазан" запущен непрерывный мониторинг геомагнитных вариаций двух ортогональных компонент магнитной индукции электромагнитного поля: B_x и B_y при помощи индукционного магнитометра разработки ГАГУ на базе датчика ИНТ-1 [Учайкин, 2015] с частотой оцифровки 100 Гц с погрешностью измерений до 0.1 пТл/с. Низкий уровень магнитных шумов на станции, которая расположена на кордоне Алтайского заповедника, и относительно высокая чувствительность аппаратуры позволяет уверенно регистрировать спектральные резонансные структуры (СРС) в полосе частот ионосферного альфвеновского резонатора и три первых шумановских резонанса (8, 14, 20 Гц).

Был проведен предварительный анализ частоты наблюдений СРС на станции за 2015-16 гг. Для этого по данным индукционного магнитометра строились динамические спектры и по характерным для СРС картинам спектров выявлялись дни их наблюдений. СРС, как правило, наблюдались в ночное время.

По итогам визуального анализа графиков были произведены расчеты для каждого месяца количества дней, когда наблюдались СРС, помехи в дневное и ночное время, а также пропуски регистрации. На рисунке 20 представлена зависимость доли дней с СРС от месяца года за исследуемый период. Хорошо заметна годовая волна с минимумом в летние месяцы. Средний процент дней с СРС на станции составляет 40%, что совпадает с результатами наблюдений на британской среднеширотной обсерватории Эксдалемур [Beggan, Musur, 2018].

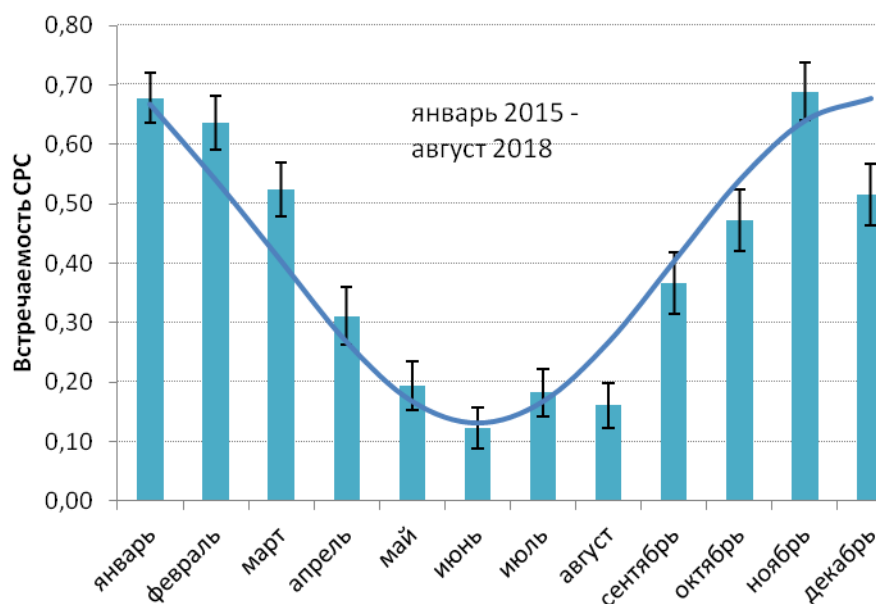


Рисунок 20- Зависимость доли дней, когда регистрировались СРС на станции «Байгазан» за 2015-18 гг. от месяца. Заметно снижение числа наблюдений летом из-за выведения энергосистемы станции молниями и более частая встречаемость СРС в холодный период. Вертикальными планками показана погрешность среднего. Кривая представляет собой косинусоидальную функцию с амплитудой 27%, средним значением 40% и сдвигом фазы на 0.5 месяца.

Регистрация спектральных резонансных структур (СРС) в диапазоне альфвеновского резонанса позволяет оценивать состояние ионосферы, в работе [Колосков] была выведена эмпирическая формула, по которой можно рассчитать критическую частоту ионосферы над магнитной станцией. Заметим, что для определения этого параметра обычно используется дорогостоящий ионозонд. Это важный параметр ионосферы, по которому можно прогнозировать космическую погоду, сейсмоактивность.

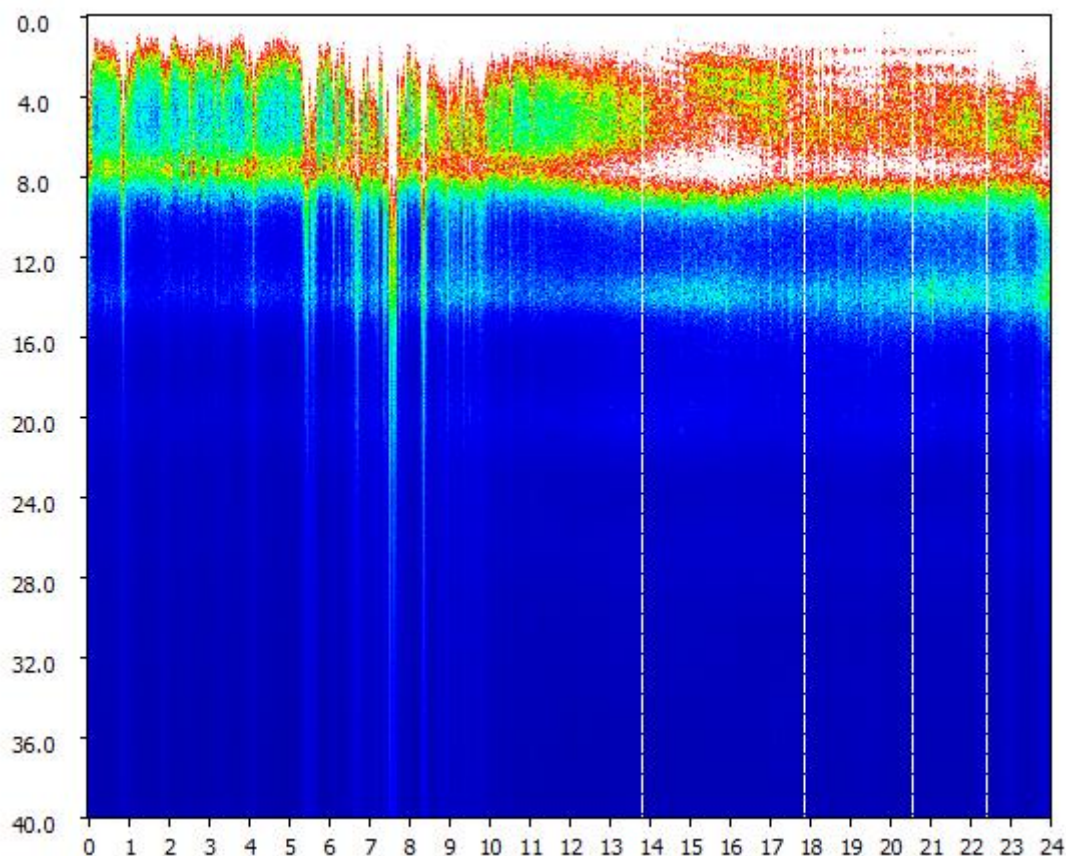


Рисунок 21 – Динамический спектр по данным индукционного магнитометра на магнитной станции «Байгазан» 29 сентября 2015 г. Видна CUF после 12 UT (ночной сектор).

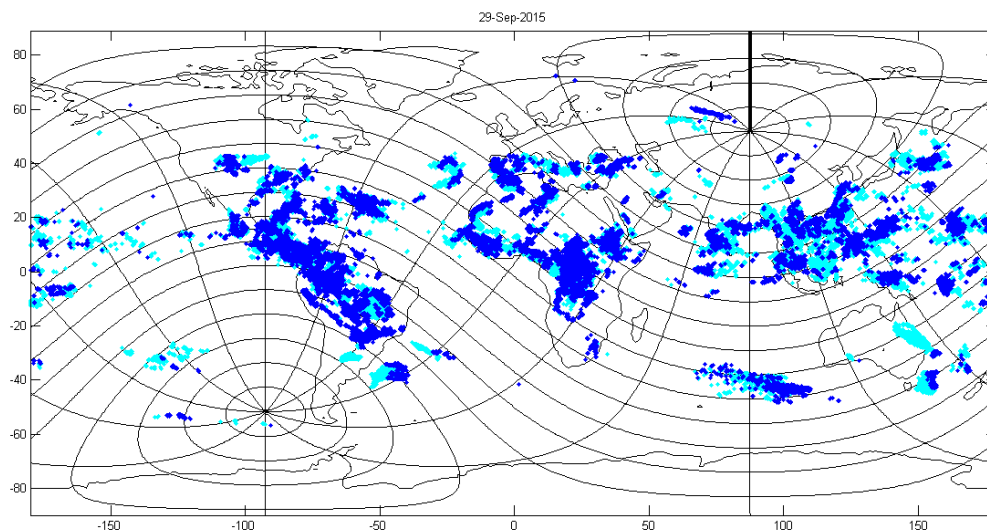


Рисунок 22 - Распределение разрядов 29.09.2015 по данным WWLLN. Синим показаны разряды после 14 UT, когда наблюдалась CUF. Нанесена сетка изолиний углов прихода волны (через 30°) и расстояний до Байгазана (через 1000 км). Хорошо видно, что есть ночные разряды на расстоянии менее тысячи километров

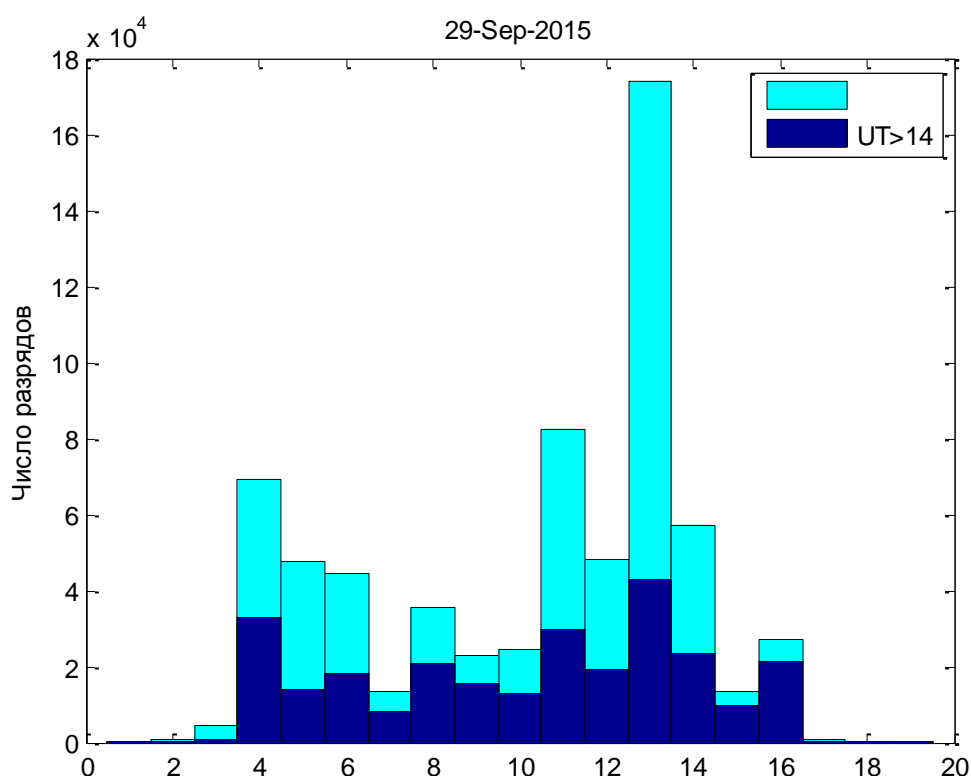


Рисунок 23 - Распределение разрядов по расстоянию до Байгазана 29 сентября 2015 г. Распределение полимодально, во время наблюдения СРС более однородно

Для проверки гипотезы методом наложенных эпох была написана программа для пакета MATLAB, которая использует данные индукционного магнитометра ИНТ-1 за один час и данные WWLLN за один день: координату разряда, X, Y, время разряда, ts, количество станций, зарегистрировавших разряд N_st. По данным WWLLN строилась карта распределения разрядов за день, гистограмма распределения расстояний до разрядов за день и после 14 UT и гистограмма углов пеленгации относительно меридиана. Примеры графиков показаны на рис.22-23

Данные ИНТ-1 фильтруются фильтром Баттерворта 4-го порядка в трех частотных полосах: 0.25-5, 5-11, 11-17 Гц. В первой полосе производится поиск импульсов с большим модулем вариаций (превышающим 4-5 стандартных отклонений), определяется время максимума энергии импульса и выбираются данные в 10 с окне вокруг этого времени. При этом порог выбирается исходя из

условия, что за час должно произойти около 20 разрядов такой амплитуды, у которых однозначно определяются координаты. Отбираются разряды вблизи времени максимума импульса, принимаемого за нулевую эпоху (максимум импульса достигался не более чем через 0.1 с после разряда).

Отрисовываются исходные и фильтрованные вариации во всех окнах, их спектры, фигуры Лиссажу за секунду в окрестности максимума и географическое положение отобранных разрядов с трассами распространения. Картинка сохраняется в файл (рис.24-25).

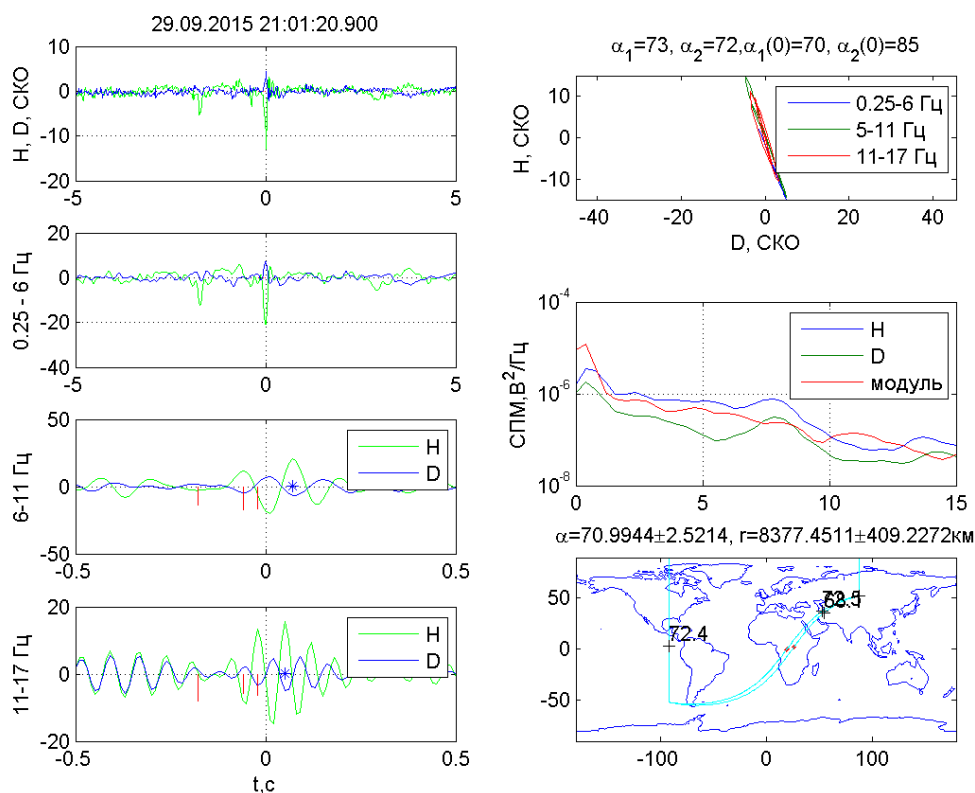


Рисунок 24 - Пример обработки отобранного импульса. Верхняя панель слева – исходные вариации в 10 секундном окне вокруг импульса, ниже слева – вариации в трех частотных окнах. Справа сверху – фигуры Лиссажу для вариаций вблизи максимума в трёх частотных окнах (в заголовке – рассчитанные углы пеленгации). Справа в центре – спектр сигнала. Справа внизу – разряды, их трассы, в заголовке – среднее расстояние и угол прихода волны.

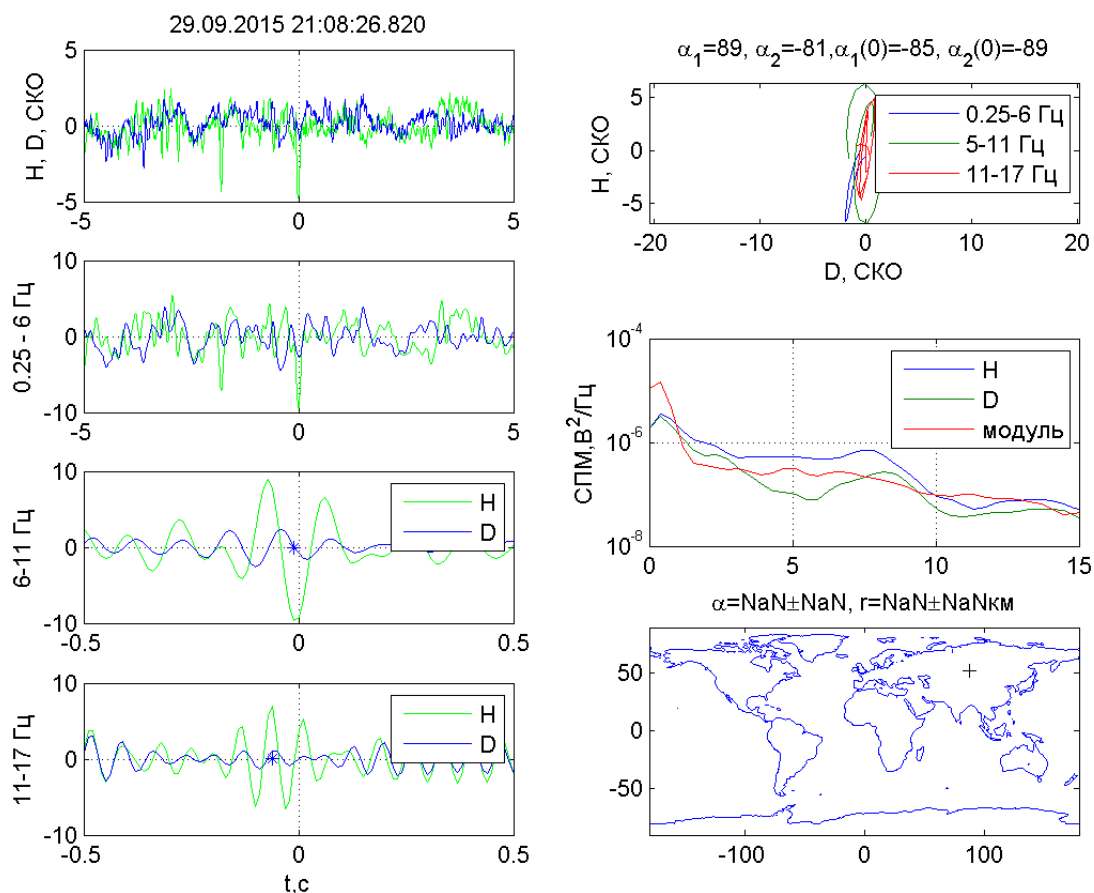


Рисунок 25 - То же, что на рисунке 21, но нет зарегистрированного WWLLN разряда

По данным во второй и третьей частотной полосе, соответствующих первой и второй моде шумановского резонанса, определяется угол пеленгации разряда. Если он совпадает с углом прихода волны от разряда по данным WWLLN с точностью 10 градусов, то источник сигнала считается идентифицированным. Если разряд только один, рассчитываются радиальная и тангенциальная компоненты импульса в первой полосе частот, для них строится спектр, отрисовываются вариации, спектры, географическое положение и траектория распространения. Картинка сохраняется в файл (рис.26).

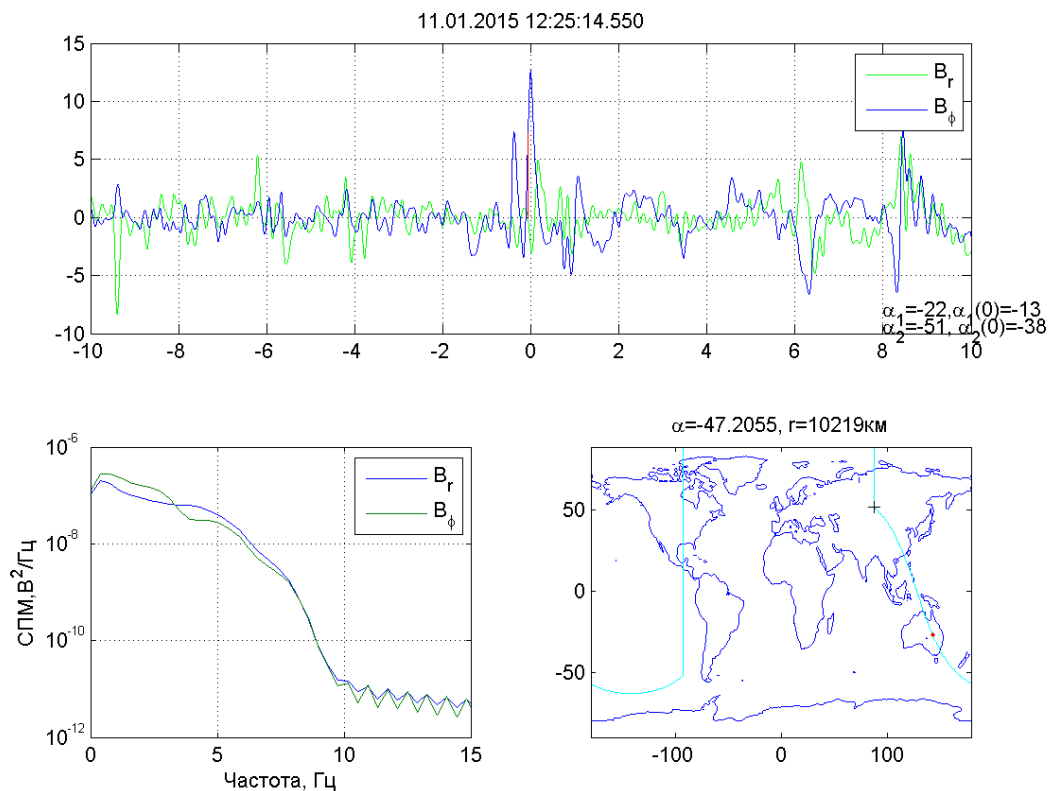
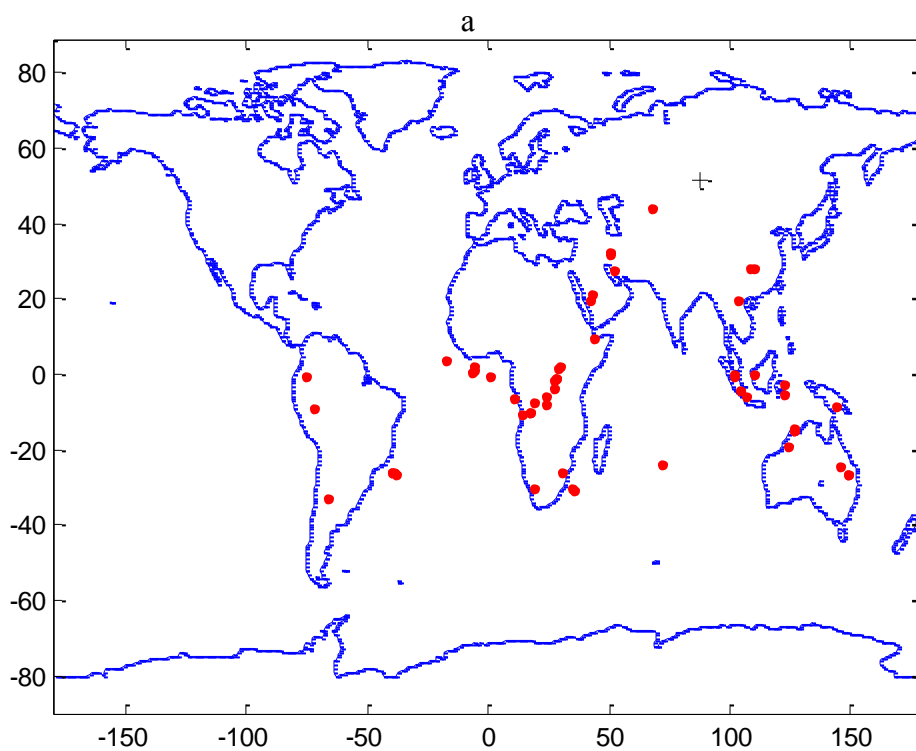
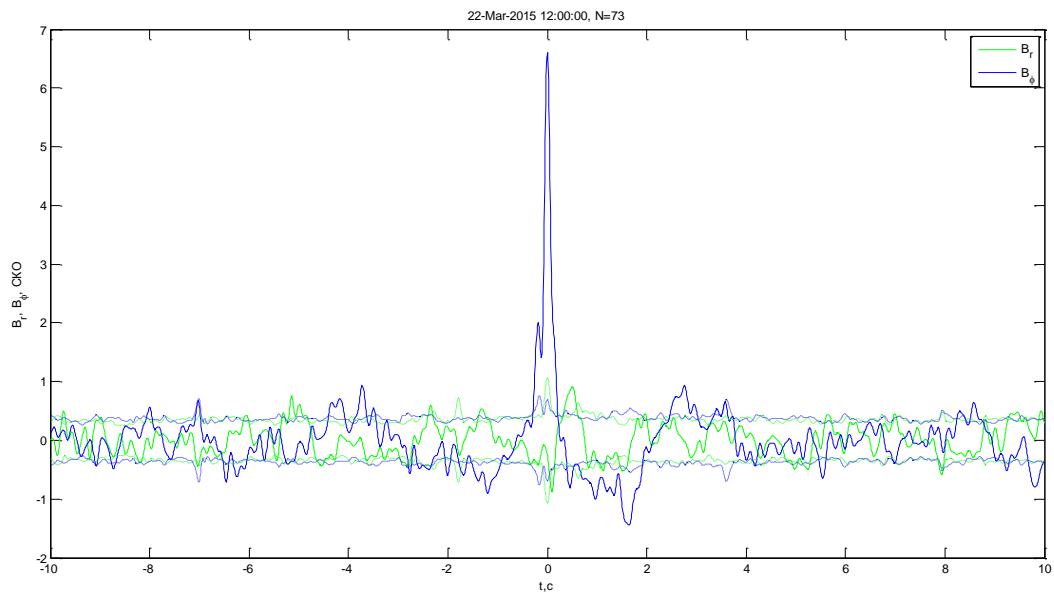


Рисунок 26 - Пример обработки импульса от идентифицированного разряда. Вверху – вариации расчётных радиальной и тангенциальной компонент в полосе частот 0.25-6 Гц, слева внизу – спектры для них, справа внизу – положение разряда и траектория

Радиальные и тангенциальные компоненты, нормированные на знак тангенциальной компоненты в нулевую эпоху, сохраняются в массив. После перебора всех импульсов за час этот массив усредняется, таким образом, реализуется метод наложенных эпох.

Результаты таких усреднений показаны на рисунке 27. Как видно из него, для радиальных компонент нам не удалось выделить чётко выраженных экстремумов – обычно хорошо виден только импульс тангенциальной компоненты (в отличие от работы Федорова с соавторами, где по наблюдениям в Японии ими уверенно фиксировались переотраженные сигналы). Возможно, дело тут в том, что Япония находится недалеко от мощного грозового очага в Индонезии, а на Алтае расстояние до мировых грозовых очагов существенно больше. Кроме того, СРС обычно фиксируются зимой, когда грозовые очаги смещаются в южное полушарие (см. рисунок 27б), а летом, когда наблюдаются местные грозы, процент наблюдения СРС невелик.



б

Рисунок 27. Результат усреднения участков рядов расчётных радиальных и тангенциальных компонент импульсов от идентифицированных разрядов (а) и положение этих разрядов (б) за 22 марта 2017 UT=12..

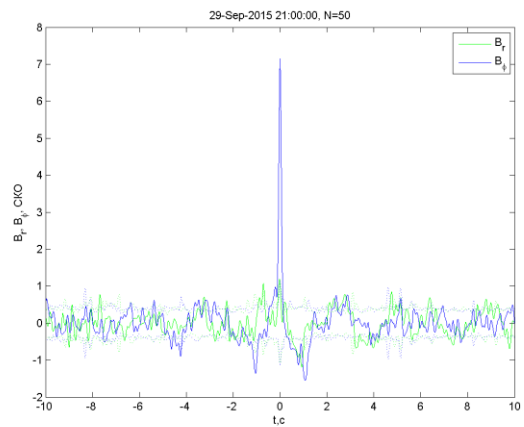
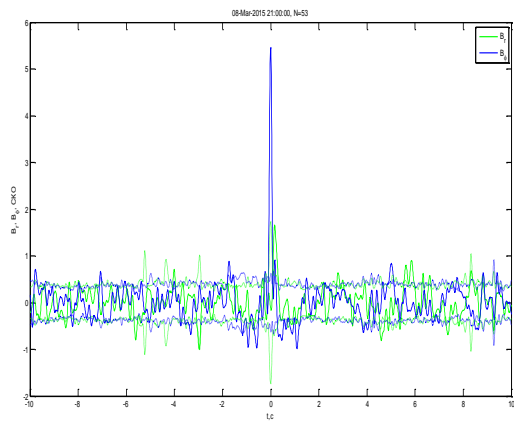


Рисунок 28 – Результаты усреднения 53 импульсов от идентифицированных источников за 08.03.15 UT=21 и 29.09.15, UT=21.

Выводы

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Установлено достаточно хорошее качественное и количественное совпадение динамики спектральных параметров (амплитуд и резонансных частот резонатора Земля-ионосфера на Горном Алтае и в Коларово). Вычисленные коэффициенты корреляции показали высокую степень статистической связи между амплитудами и частотами ШР в двух пунктах наблюдения. Обнаружено снижение резонансных частот на обоих пунктах за 2015-18 гг., наиболее ярко проявляющееся у первой гармоники, для второй гармоники характерна значительная годовая вариация, а для третьей - полугодовая вариация.
2. Выявлены региональные особенности поведения резонансных частот шумановских резонансов. Резонансные частоты на Горном Алтае оказались в среднем ниже, чем в Коларово (Томская область) для всех трех мод ШР, а добротности выше.
3. Разработан индукционный магнитометр на базе датчиков SCAT. Создан пункт регистрации КНЧ электромагнитного фона в окрестностях с. Бичикту Бом Онгудайского района Республики Алтай. В настоящее время производится накопление результатов измерений
4. Проведено исследование спектральных резонансных структур в полосе частот ионосферного альфвеновского резонатора по данным магнитной станции "Байгазан" за 2015-18 гг. Выявлена годовая динамика доли дней с СРС на Байгазане, представляющая собой квазисинусоидальную волну амплитудой 27% при среднем значении 40% и максимумом в зимние месяцы.
5. Разработана программа для выявления переотражения от верхней границы ионосферного альфвеновского волновода импульсов от идентифицированных грозных разрядов методом наложенных эпох, использующая данные индукционного магнитометра магнитной станции «Байгазан» и мировой сети регистрации грозных разрядов. Идентификация осуществлялась по совпадению времени разряда и импульса в пределах 0.1 с и совпадению угла прихода волны с рассчитываемым по сигналам для 1-го и второго

шумановского резонанса угла пеленгации разряда. Проведен анализ данных за 29.09.15, 11.01.15, 08.03.15, 22.03.15 для часов, когда наблюдались СРС. Статистически значимых эффектов переотражения не выявлено.

Литература

1. Колесник, С.А. Вариации спектральных характеристик шумановских резонансов по данным многолетних магнитных измерений в Томске / Колесник С.А., Колмаков А.А., Недосеков Д.А., Шошин Е.Л. // Изв. вузов. Физика. – Т.59, 2016.– № 12/2.– С. 181–184.
2. Колосков, А.В. Околосемные резонаторы СНЧ-волн как индикатор космической погоды / А.В. Колосков, В.Г. Сеницын, Н.Н. Герасимова, Ю.М. Ямпольский // Космическая наука и технология., Т.14, №5, с. 49-64 (ISSN 1561-8889)
3. Комплексное научное изучение территории Башадарских курганов 2004-2011 гг.: Препринт ГАГУ – 2013/1. – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2013. – 120 с.
4. Учайкин, Е.О. Разработка индукционного магнитометра на основе датчика ИНТ-1 и результаты мониторинга на магнитной станции Байгазан/ Учайкин Е.О., Кудин Д.В., Гвоздарев А.Ю. // Взаимодействие полей и излучения с веществом: Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и конференции молодых ученых. - 2015. - С. 267-268.
5. Belyaev, P. P. The ionospheric Alfvén resonator / P. P. Belyaev, S. V. Polyakov, V. O. Rapoport, and V. Y. Trakhtengertz // J. Atmos. Terr. Phys. - Vol. 52 -1990. - P. 781–787.
6. C. D. Beggan and M. Musur Observation of Ionospheric Alfvén Resonances at 1–30 Hz and Their Superposition With the Schumann Resonances // Journal of Geophysical Research: Space Physics - 10.1029/2018JA025264 - P. 4202-4214.
7. Fedorov, E., A. Schekotov, Y. Hobara, R. Nakamura, N. Yagova, and M. Hayakawa The origin of spectral resonance structures of the ionospheric Alfvén resonator. Single high-altitude reflection or resonant cavity excitation?// J. Geophys. Res. Space Physics, (2014), 119, doi:10.1002/2013JA019428
8. S.A. Kolesnik, A.A. Kolmakov, I.Yu. Tsyupa "Estimation of local thunderstorms at the level of extremely low-frequency electromagnetic background in Tomsk" // Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1083321 (13 December 2018); doi: 10.1117/12.2504456.
9. S.A. Kolesnik, A.A. Kolmakov, I.Yu. Tsyupa "Analysis of the polarization characteristics of the Schumann resonances from the data of long-term measurements in Tomsk"// Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1083320 (13 December 2018); doi: 10.1117/12.2504448.
10. A.A. Kolmakov, I.Yu. Tsyupa «Estimation of the effect of solar activity on the state of the earth ionosphere resonator from the data of long term magnetic

measurements of ELF fields in Tomsk»// Proceedings of the VII International Conference “APR–2017”. Tomsk, 18-22 September 2017. Red Square Scientific, London, 2018 – P. 36–40.