

Введение

Регистрация магнитных вариаций играет важную роль в исследовании процессов в ионосфере и магнитосфере Земли, позволяя фиксировать электрические токи, текущие в её газоплазменных оболочках в условиях различных космических событий: солнечных вспышек, магнитных бурь, пересечений секторов межпланетного магнитного поля. Эта информация находит практическое применение в радиосвязи, управлении искусственными спутниками Земли, используется при геолого-геофизической разведке недр, бурении скважин. Кроме того, развиваются работы по изучению предвестников землетрясений в геомагнитных вариациях. В последнее время обращается особое внимание на экологическую роль магнитных вариаций для биосферы и человека.

Необходимо подчеркнуть, что важную роль в исследовании геомагнитных вариаций играет развитие сети магнитных обсерваторий – например, в современной сети цифровых магнитных обсерваторий, представляющих информацию о геомагнитном поле в оперативном режиме INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org>) сейчас состоит 133 магнитных обсерватории (6 – в России). В России, при её огромных масштабах, сеть магнитных обсерваторий развита явно недостаточно. На Алтае до 2009 г. регистрация магнитных вариаций осуществлялась в Акташе [Djadkov et al, 2007], однако в целях максимизации тектономагнитного эффекта станция была установлена на магнитной аномалии, то есть она не может использоваться как базисная при изучении геомагнитного поля на Алтае.

В декабре 2009 г. в результате выполнения гранта РФФИ на кордоне Алтайского заповедника Байгазан (Телецкое озеро) начала работать новая магнитная станция, осуществляющая непрерывную регистрацию геомагнитных вариаций (Гвоздарев и др, 2010; Измерения..., 2012). Станция удалена от промышленных объектов и транспортных магистралей, а ее расположение на территории заповедника гарантирует неизменность магнитной обстановки в течение длительного периода. Питание станции

осуществляется от солнечной батареи пиковой мощностью 230 Вт и ветрогенератора пиковой мощностью 300 Вт. На кордоне возведен павильон из немагнитных материалов, для регистрации DHZ-вариаций геомагнитного поля с частотой 5 Гц используется цифровая магнитовариационная станция «Кварц-3ЕМ» с регистратором разработки лаборатории робототехники ГАГУ (Кудин, Учайкин, 2010). Удаленность от промышленных районов и применение современной малошумящей электроники позволяет производить на станции записи естественных геомагнитных вариаций с рекордно низким уровнем шумов - около 0.01 нТл (Гвоздарев и др, 2011), в то время, как для магнитных обсерваторий международной сети INTERMAGNET рекомендуемый уровень шумов составляет 0.1 нТл. На ближайшей к Алтаю магнитной обсерватории в Новосибирске («Ключи») производятся в условиях все возрастающей техногенной нагрузки, что приводит к шумоподобным помехам амплитудой до 1 нТл и импульсным помехам до 4-5 нТл. Отметим, что в 2012 г. в Восточном Казахстане появилась новая магнитная станция «Курчатов» Института геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан (Беляшов и др., 2012), что позволяет в перспективе создать довольно густую сеть с шагом около 400 км для изучения магнитных вариаций на Алтае.

В 2012 г в рамках научно-технического проекта Министерства образования, науки и молодежной политики Республики Алтай для дальнейшего развития станции по пути к магнитной обсерватории был разработан и установлен на ней протонный магнитометр, необходимый для контроля базисных значений кварцевой вариационной станции. Это позволило существенно повысить надёжность данных станции. Однако существенную роль при расчёте базисных значений играет также информация о температурных коэффициентах базисных значений. На станции оценка этих коэффициентов проводилась лишь однажды, в октябре 2011 года, во время проведения абсолютных измерений с.н.с. геофизической обсерватории «Ключи» Хомутовым С.Ю. – для проведения таких измерений требуется

дорогостоящее оборудование (инклинометр-деклинометр на базе немагнитного теодолита), отсутствующее на нашей станции. Поэтому важное значение приобрела разработка методики расчёта этих коэффициентов на основе имеющихся данных станции. Предполагалось использовать для этого ночные данные в магнитоспокойные дни, сопоставляя их со значениями температуры.

Кроме того, за годы развития приборной базы станции нами был накоплен значительный опыт в разработке регистрирующей аппаратуры. Это создало предпосылки для создания новой версии регистратора для кварцевого вариометра с улучшенными характеристиками за счёт оптимизации программного обеспечения и подбора комплектующих.

В 2012 г. станция продолжала непрерывную регистрацию геомагнитных вариаций, однако полученные данные ещё не анализировались. Кроме того, важное значение имеет сопоставление данных станции с измерениями расположенных поблизости магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET (Алма-Ата, Урумчи, Новосибирск, Иркутск) за прошлые годы. Это необходимо для выявления региональных особенностей геомагнитных вариаций на территории Горного Алтая, также эта работа является подготовительным этапом для совместного анализа вариаций на станциях Алтае-Саянского региона для расчёта токовых функций в ионосфере над ним и магнитовариационного зондирования литосферы региона.

Необходимость простейшего анализа геомагнитной возмущённости (расчёт К-индекса) требует знания суточной вариации для новой станции. Эта, по сути рутинная работа, пока ещё не была сделана.

Ещё одним важным направлением в анализе магнитных вариаций является изучение короткопериодических колебаний геомагнитного поля (микроразрывов). Однако для развития этих работ необходимо освоить методику спектрального анализа временных рядов, выбрать оптимальный метод анализа для конкретных данных.

Наряду с измерениями на базовой станции важно изучать изменение вариаций по территории Горного Алтая. Предполагалось вести такое изучение во время экспедиционных работ на мониторинговых площадках вблизи с. Кулада, Верх-Уймон, Курай, Джазатор во время комплексных экспедиций по изучению эффектов биоиндикации на разломных зонах совместно с Центральным ботаническим садом и Институтом водных и экологических проблем СО РАН.

Подытожив все описанное выше, сформулируем задачи проекта:

1. Поддержка непрерывного мониторинга вариаций геомагнитного поля на магнитной станции «Байгазан», расположенной на одноименном кордоне Алтайского заповедника (Телецкое озеро), при помощи цифровой магнитовариационной станции «Кварц-ЗЕМ» и протонного магнитометра.
2. разработка новой версии регистратора для кварцевого вариометра;
3. отработка методов спектрального анализа данных для выделения устойчивых микропульсаций;
4. анализ температурной стабильности базисных значений кварцевого вариометра;
5. периодическое определение базисных значений при абсолютных измерениях;
6. сопоставление вариаций на станции «Байгазан» с результатами измерений на близко расположенных магнитных обсерваториях сети Интермагнет (Алма-Ата, Урумчи, Новосибирск, Иркутск) за прошлые годы;
7. расчёт суточной вариации и К-индексов геомагнитной возмущённости;
8. измерение вариаций геомагнитного поля в различных пунктах Горного Алтая.

1. Разработка новой версии регистратора для кварцевого вариометра
 В 2009 г на станции Байгазан был начат мониторинг вариаций геомагнитного поля. Обсерваторией «Арти» Горно-Алтайскому университету была передана цифровая магнитовариационная станция «Кварц-ЗЕМ», электроника которой сгорела в результате разряда молнии. Блоки усилителей и калибровки были отремонтированы в обсерватории «Ключи», а блок регистрации был разработан заново лабораторией робототехники ГАГУ на основе современной элементной базы (Кудин, Учайкин, 2010), при этом он удовлетворял следующим требованиям:

- точность измерений порядка 0.01 нТл при динамическом диапазоне ± 1000 нТл;
- частота регистрации – 5 раз в секунду;
- низкое энергопотребление (не более 2 Вт);
- непрерывная запись данных на цифровой носитель в течение полугода без его смены;
- использование в конструкции немагнитных материалов.

Однако опыт эксплуатации станции выявил ряд недостатков, которые удалось частично или полностью устранить в новой версии:

- при низких температурах (около 30 градусов мороза) регистрация прекращалась из-за отказа оптопар развязки;
- в спектре магнитного сигнала наблюдались гармоники на частоте 1 и 2 Гц.

Блок-схема нового регистратора (см. рис. 1) в целом не слишком отличается от начальной версии



Рис. 1. Блок схема регистратора данных

Плата регистратора данных построена на основе 16-битного микроконтроллера PIC24HJ128GP, который работает на частоте 80МГц, что

обеспечивает регистратору хорошее быстродействие. На плате также имеется разъем для карт памяти MMC/SD до 2 Gb для хранения на них геофизических данных в бинарном или файловом виде. Кроме того, к контроллеру подключены через внутренние разъемы GPS с внешней выносной антенной, используемый для синхронизации времени и геодезических координат, и ЖК-дисплей для отображения информации об измерениях. Также на плате регистратора предусмотрен разъем 1-Wire для поддержки прецизионных термометров DS18B20 с точностью определения температуры до 1/16 градуса, чтобы максимально точно контролировать параметры геофизического прибора.

К регистратору подключаются модульный GPS (A1080) и ЖК-дисплей (рис.2). Для подключения GPS достаточно четырёх независимых проводов: +,- питания 3,3В, TX и RX последовательного интерфейса COM. Дисплей TIC32 подключается по шине I²C, которая требует 4 провода вместе с питанием, это возможно благодаря встроенному в сам дисплей контроллеру PCF8535.

Основной отличительной чертой разработанной платы регистратора является наличие цифрового порта, служащего для подключения АЦП, либо компаратора для снятия данных с протонных и квантовых магнитометров (выделен прямоугольником на рис. 2). Цифровой порт имеет 7 независимых аналогово-цифровых линий к микроконтроллеру, которые позволяют организовать последовательный интерфейс SPI для внешних АЦП или компаратор. На входе АЦП установлены RC-фильтры, пропускающие низкие частоты, так как датчик ЦМВС «Кварц-ЗЕМ» ввиду конструктивных особенностей способен улавливать изменения магнитного поля на частотах не более 10 Гц. Введение фильтров позволяет значительно снизить шумовую составляющую в записях магнитометра.

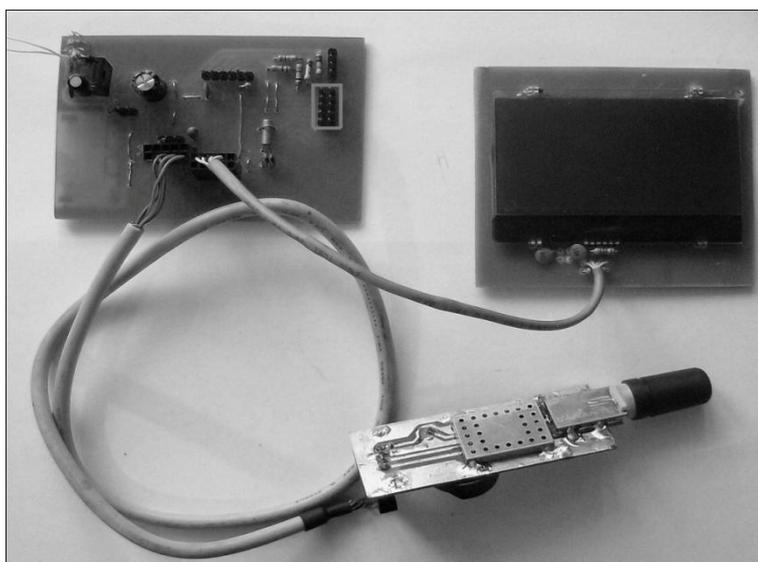


Рис. 2. Плата регистратора и подключенные к нему LCD и GPS модуль

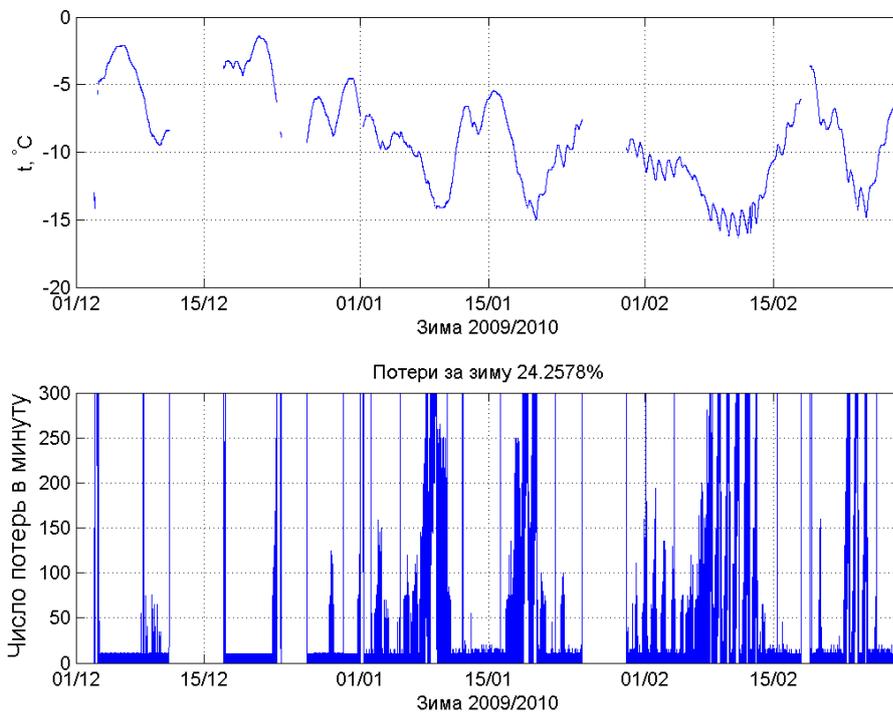
На вход регистратора подаётся три дифференцированных аналоговых сигнала амплитудой до ± 10 В с магнитных датчиков Бурцева-Белова магнитовариационной станции (МВС) «Кварц-ЗЕМ» (D, H, Z-компоненты геомагнитного поля), которые оцифровываются при помощи 2-х прецизионных 24-битных АЦП AD7732BRU (отсчётная точность 0.0001 нТл). Для подавления шумов использована развязка цифрового интерфейса SPI между платой регистратора и АЦП при помощи магнитных изоляторов. Эта конфигурация позволяет подключиться к блоку усиления МВС через свободную (сигнальную) землю, что обеспечило высокое отношение сигнала к шуму. Запись данных (время, три компоненты магнитного поля, температура) в буфер контроллера производится 5 раз в секунду, каждая запись компонент магнитного поля получается в результате усреднения 64 измерений АЦП. По сравнению с предыдущей версией регистратора существенно увеличена скорость интерфейса связи микроконтроллера с АЦП, путем замены оптопар на магнитные изоляторы. Это позволило увеличить частоту выборки данных с АЦП в 5 раз. При заполнении буфера (примерно раз в 10 с) данные объёмом 512 байт записываются в отдельный кластер флеш-карты типа MMC/SD (используются карты объёмом до 2 Гб). Такая система записи по сравнению с FAT16 позволяет не терять данные при неожиданном отключении питания и экономить место на флеш-карте. Для

считывания данных написано специальное приложение под ОС Windows. Регистратор смонтирован в алюминиевом корпусе. Время, результаты измерений по трём каналам (в вольтах) и температура раз в секунду выводятся на жидкокристаллический дисплей.

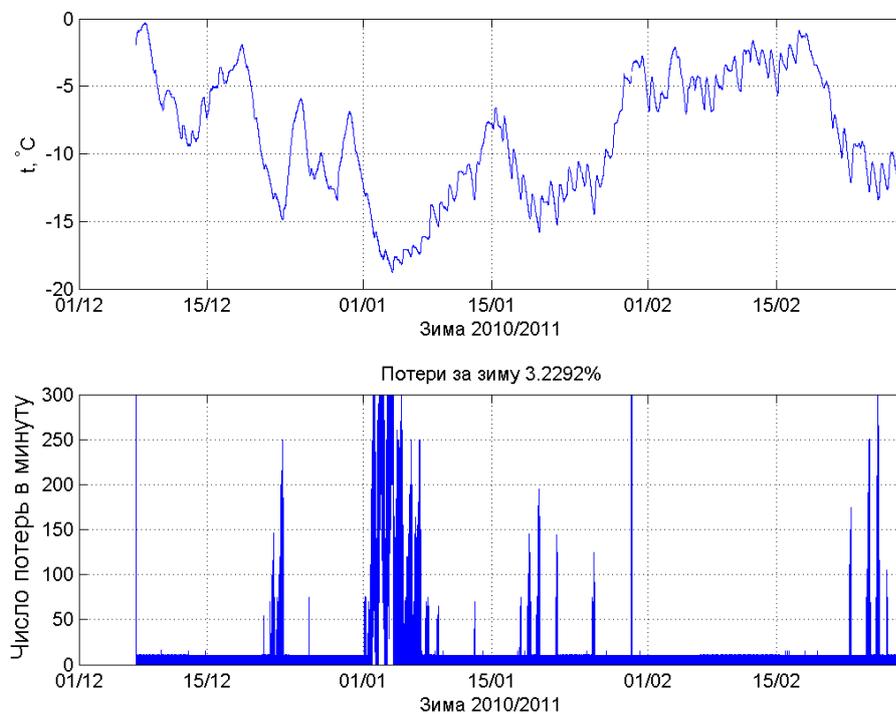
Опыт эксплуатации (система работает в непрерывном режиме с 30.09.2012) показал, что амплитуда шума системы (среднеквадратичное отклонение за секундный интервал) удалось опустить до 0.003 нТл при благоприятных условиях. Заметим, что в настоящее время требования международной сети INTERMAGNET к точности измерения вариаций составляют 0.1 нТл, - таким образом, достигнутое качество записи значительно превышает эти требования. Разработанный нами регистратор позволил улучшить параметры МВС по сравнению с серийными образцами «Кварц-ЗЕМ» и «Кварц-4» разработки ИЗМИРАН (точность 0.1 нТл, частота регистрации 1 Гц).

Опыт эксплуатации регистратора кварцевого вариометра показал, что основной причиной сбоев в работе ранней версии являлись низкие температуры. На рис.3 приведены данные о температуре в блоке регистратора и потерях в течение зим 2009/10 (а), 2010/11 (б), 2011/12 (в) и 2012/13 (г) годов. Потери первой зимы, достигающие 24% данных, вызваны в основном простоями станции в результате замерзания аккумулятора, питающего её. После наладки системы энергоснабжения в следующие две зимы потери уменьшились до 3% и 5% соответственно. На графиках видно, что они приурочены к сильным морозам, при которых отказывала оптическая развязка. Некоторое увеличение потерь в 2011-12 гг. было вызвано затиранием некоторых секторов на SD-карте в результате превышения допустимого количества записей. Данные с 27.01.2012 до 01.03.2012 были потеряны в результате отказа карты записи. После установки новой версии регистратора, в которой оптопару заменили на магнитные изоляторы, потери за зимний сезон 2012/13 гг. упали до 0.8% - в основном они были связаны с

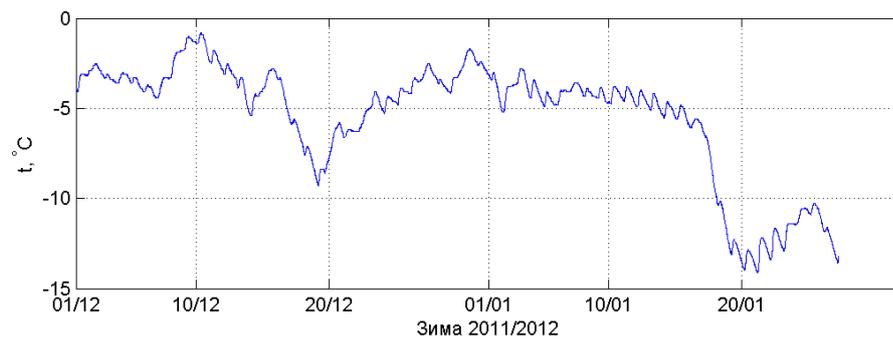
заменой флеш-карт и профилактическими работами, а также потерями во время привязки GPS-модема к точному времени.



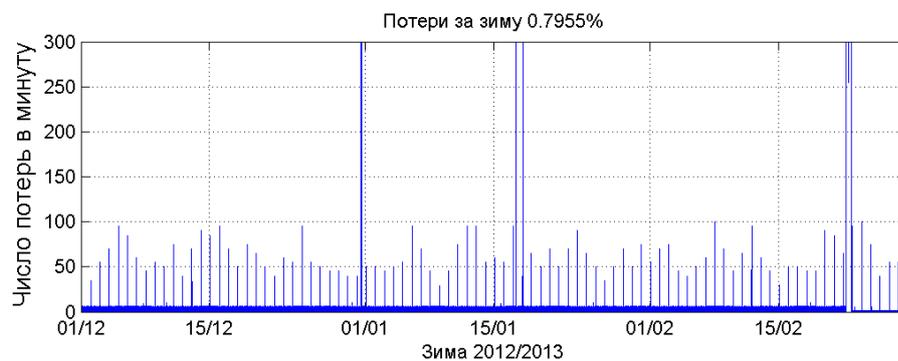
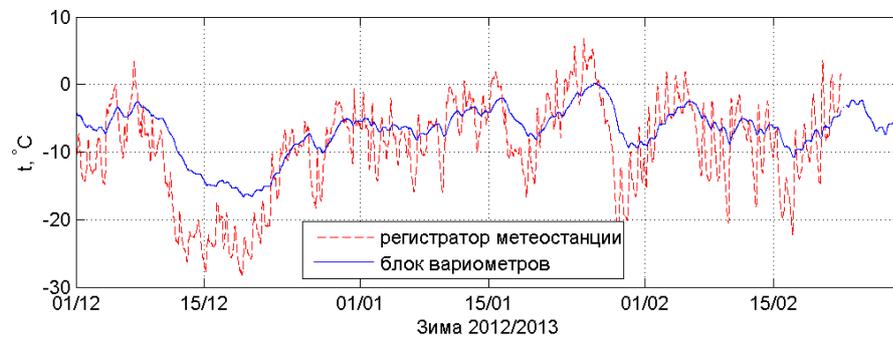
а



б



В



Г

Рис. 3. Динамика температуры в блоке вариометров и потерь измерений станции за четыре зимы: а – 2009/10, б – 2010/11, в – 2011/12, г - 2012/13 гг.

Как видно из графика, в декабре 2012 г. наблюдалась довольно низкая температура, но потерь данных не было. На графике за последний сезон показана также температура, снимаемая внутренним датчиком регистратора метеостанции. Он размещен в небольшом павильоне, и в целом можно считать, условия для него и регистратора кварцевого вариометра довольно схожими. Из сравнения графиков видно, что за счёт более слабой термоизоляции график температуры в регистраторе более изрезан и подвержен большим колебаниям. В частности, во время морозов в декабре 2012 г., температура в регистраторе упала почти до 30 градусов мороза. Видимо, снижение до столь низких температур и выводило из рабочего состояния оптопару в ранней версии регистратора.

2. Выделение устойчивых микропульсаций при помощи спектрального анализа записей магнитных вариаций

Важным направлением в анализе магнитных вариаций является изучение короткопериодических колебаний геомагнитного поля (микропульсаций). Однако для развития этих работ необходимо освоить методику спектрального анализа временных рядов, выбрать оптимальный метод анализа для конкретных данных. До сих пор нами использовалось только быстрое преобразование Фурье (БПФ), которое имеет некоторые недостатки при изучении случайных сигналов. В частности, при большом количестве отсчетов спектр мощности случайного сигнала, построенный таким методом, дает лишь оценку реального спектра, причём эта оценка не является состоятельной, так как её дисперсия сравнима с квадратом математического ожидания при любом количестве замеров. С этим связаны сильные флуктуации, наблюдаемые в спектрах БПФ, сопоставимые по порядку величины с амплитудой спектральных пиков, что осложняет их выделение. Обычно для борьбы с этим явлением используется сглаживание: для этого, например, спектр строится в нескольких перекрывающихся окнах, а затем полученные значения усредняются (метод Уэлча). В пакете математических программ MATLAB данный метод реализуется функцией `pwelch()` с синтаксисом

$$[P_{xx},f] = \text{pwelch}(x, \text{window}, [], \text{nfft}, F_s);$$

где P_{xx} – спектральная плотность мощности ($\text{нТл}^2/\text{Гц}$), f – вектор частот, x – исследуемый сигнал, window – длина окна, nfft – длина вектора для расчёта БПФ, F_s – частота дискретизации сигнала. Перекрытие окон по умолчанию составляет 50%.

С целью освоения методики её использования были взяты данные за 10-19 ноября 2012 г, характеризующиеся довольно низким уровнем шума и малым количеством выбросов. Начало периода характеризуется спокойным геомагнитным полем, 13-14 ноября произошла геомагнитная буря, далее идут процессы восстановления геомагнитного поля.

В результате пробных расчётов были подобраны необходимые значения длины вектора для расчёта БПФ (длина окна усреднения выбиралась равной ей) в зависимости от типа микропульсаций, которые необходимо выделить в спектре. Результаты приведены в таблице. При большей длине окна усреднение по всем окнам не давало хороших результатов – в спектре наблюдались заметные флуктуации. Заметим, что для выявления Pc4 необходим интервал времени не менее часа, что соответствует длительности от двух до семи десятков колебаний этого класса. Аналогичные условия наблюдаются и для всех остальных типов колебаний.

Таблица 1

Значения параметров спектрального метода Уэлча, необходимые для выявления в спектре различных типов микропульсаций

Тип пульсаций	window и nfft	Длина окна в с	nfft/T
Pc1 (T=0.2-5с)	2^9	102.4 (1 мин 42.4с)	512 - 20
Pc2 (T=5-10с)	2^{11}	409.6 (6 мин 49.6с)	82 - 41
Pc3 (T=10-45с)	2^{13}	1638.4 (27 мин 18.4с)	164 - 36
Pc4 (T=45-180с)	2^{14}	3276.8 (54 мин 36.8с)	72 - 18
Pc5 (T=180-600с)	2^{15}	65536 (1ч 49мин 13.6с)	36 - 11

Кроме того, в качестве пробы использовался метод Томсона, однако выявилось, что он требует значительного машинного времени для анализа при сходных результатах.

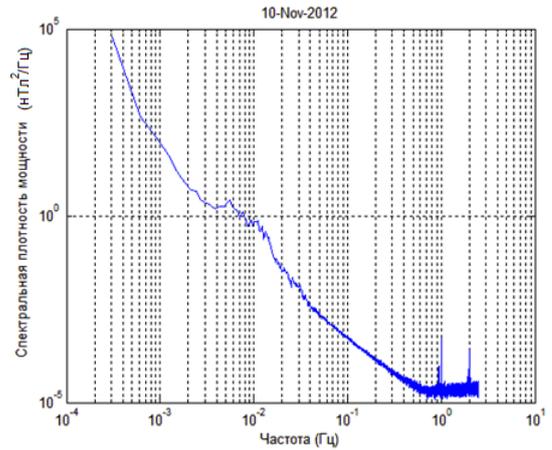
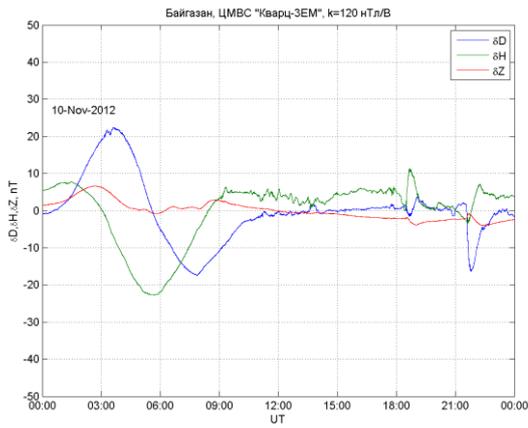
Анализ показал, что в спектре микропульсаций, посчитанном за сутки, происходят заметные изменения, связанные с геомагнитной активностью. Почти в каждом спектре присутствуют пульсации Pc3 и Pc4 типов. На некоторые из них следует обратить особое внимание. Например, в спектре 14 ноября 2012 года, пульсации отсутствуют вообще. В тот день как раз закончилась магнитная буря. А в спектре за 13 ноября 2013 года, т.е. в день самой бури, имеются сразу Pc3 и Pc4 пульсации. Из литературы известно, что Pc3 и Pc4 пульсации нередко происходят одновременно в возмущенной

обстановке. На второй, третий и четвертый день после завершения магнитной бури (15, 16 и 17 ноября) повторяются Pс3 пульсации, постепенно переходящие в Pс4, что также соответствует теоретическому описанию восстановительной фазы магнитной бури.

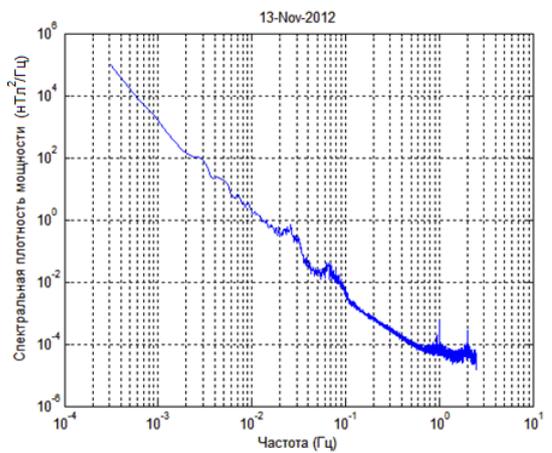
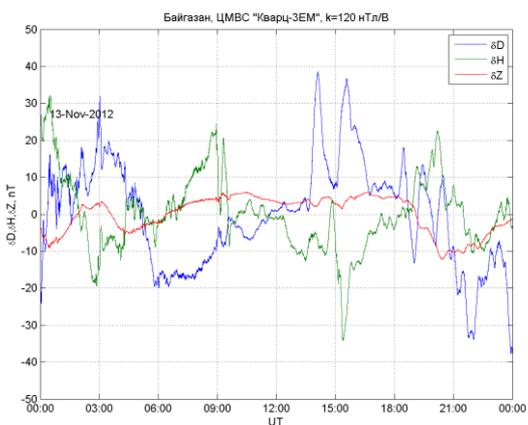
18 и 19 ноября кроме Pс3 и Pс4 пульсаций заметно увеличение СПМ на частотах, соответствующих пульсациям Pс1 типа. Из литературы известно, что они чаще всего наблюдаются на 3-6 дни после бури в предутренние часы. В этом случае они выявились на четвертый день после окончания бури, что не противоречит обычным наблюдениям.

Для дальнейшего уточнения времени наблюдения тех или иных микропульсаций сутки разбивались на небольшие интервалы времени и уже для них производился расчёт спектральной плотности мощности методом Уэлча. Анализ показал, что микропульсации класса Pс1 наблюдались 18 октября в течение примерно 45 минут с 19:10 до 19:55 UT (предутренние часы). Кроме того, за час до этих пульсаций и почти через 3 часа после, были два всплеска Pс1 пульсаций большей частоты, но меньшей длительности.

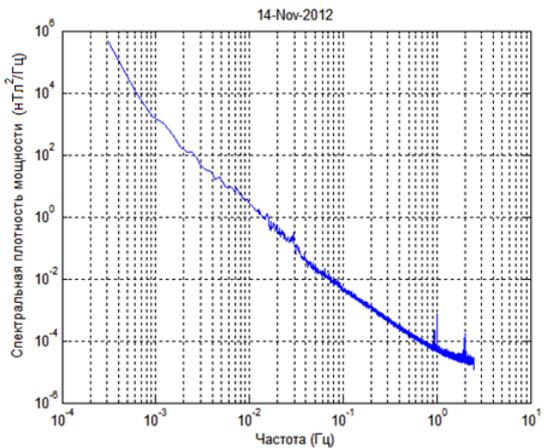
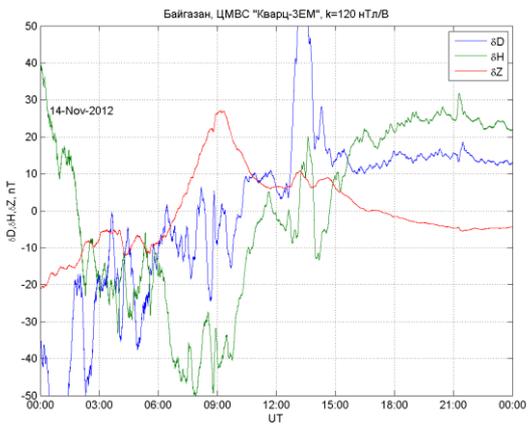
Особый интерес вызвало наблюдение микропульсаций класса Pс1, так как обычно для этого использовались не магнитомеханические, а индукционные магнитометры. На рис. 5 показан спектр горизонтальной компоненты за 15 минутный интервал с 19:15 по 19:30 UT (что соответствует 02:15-02:30 локального времени) и график вариаций за двухминутный интервал внутри него. Амплитуда вариаций достигает 0.05 нТл и конечно, они не могли фиксироваться кварцевым вариометром «Кварц-ЗЕМ» или «Кварц-4» в стандартной комплектации, так как у них отсчётная точность составляла 0.1 нТл. Между тем, как показывает наш опыт, кварцевые вариометры пригодны для наблюдения всех типов микропульсаций от Pс1 до Pс5 при использовании современной элементной базы для регистратора вариометра.



а

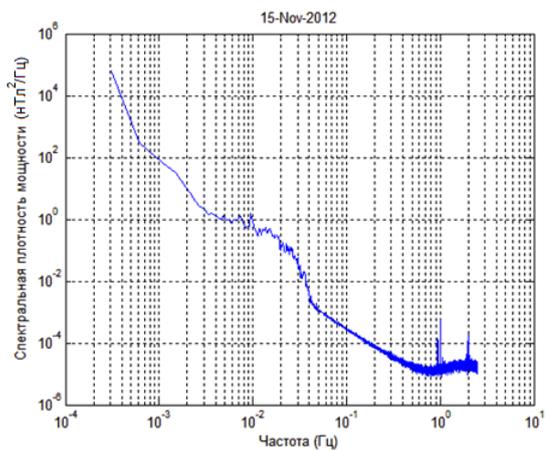
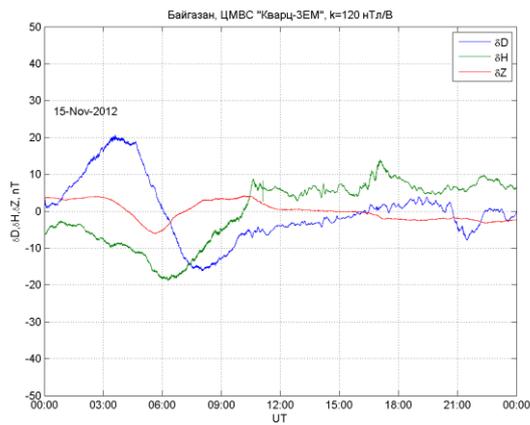


б

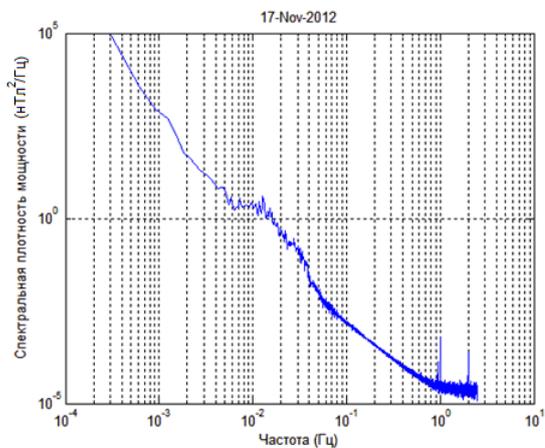
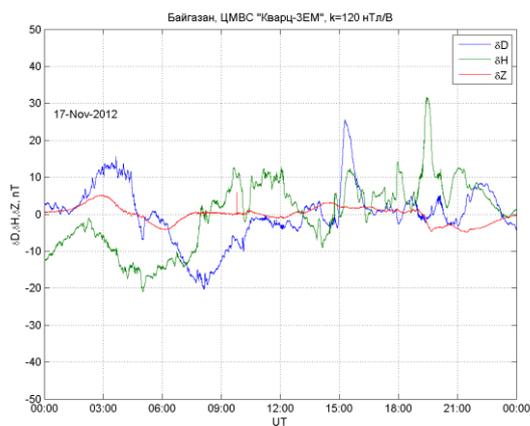


в

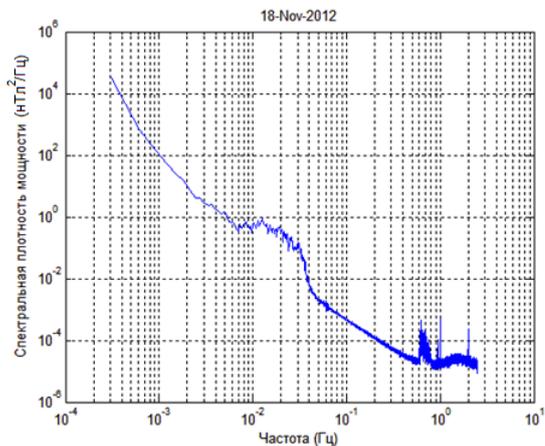
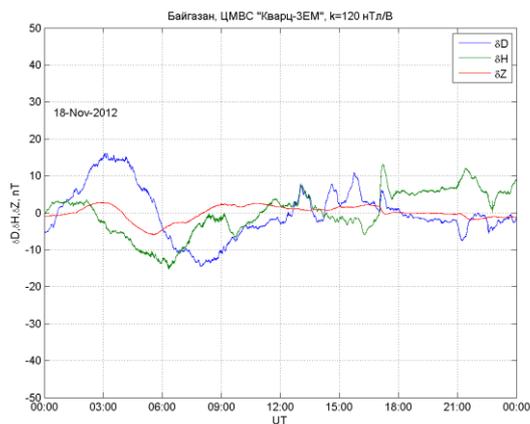
Рис.4 (начало). Вариации геомагнитного поля за сутки на магнитной станции Байгазан (слева) и спектр горизонтальной компоненты, посчитанный методом Уэлча (справа). Ширина окна сглаживания 2^{14} отсчётов, перекрытие 50%: а – 10 ноября 2012 г. (магнитоспокойная обстановка), б – 13 ноября 2012 г. (магнитная буря), в – 14 ноября 2012 г. (завершение магнитной бури).



Г

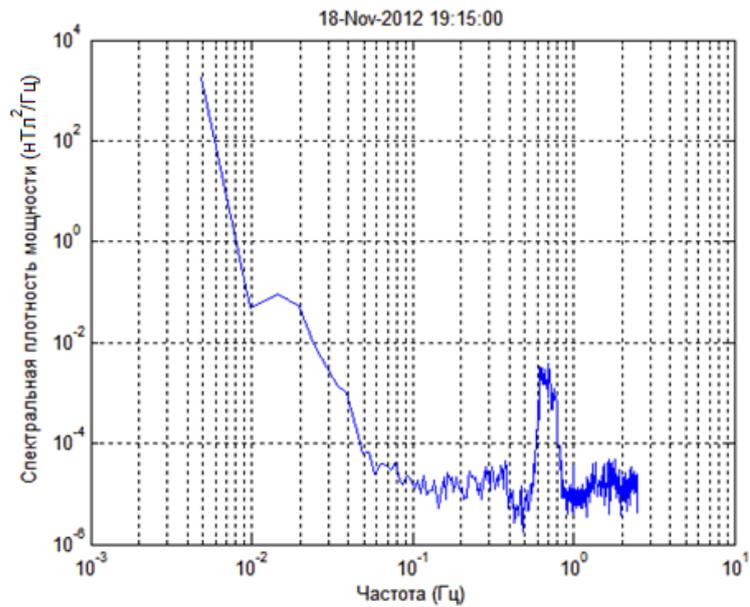


Д

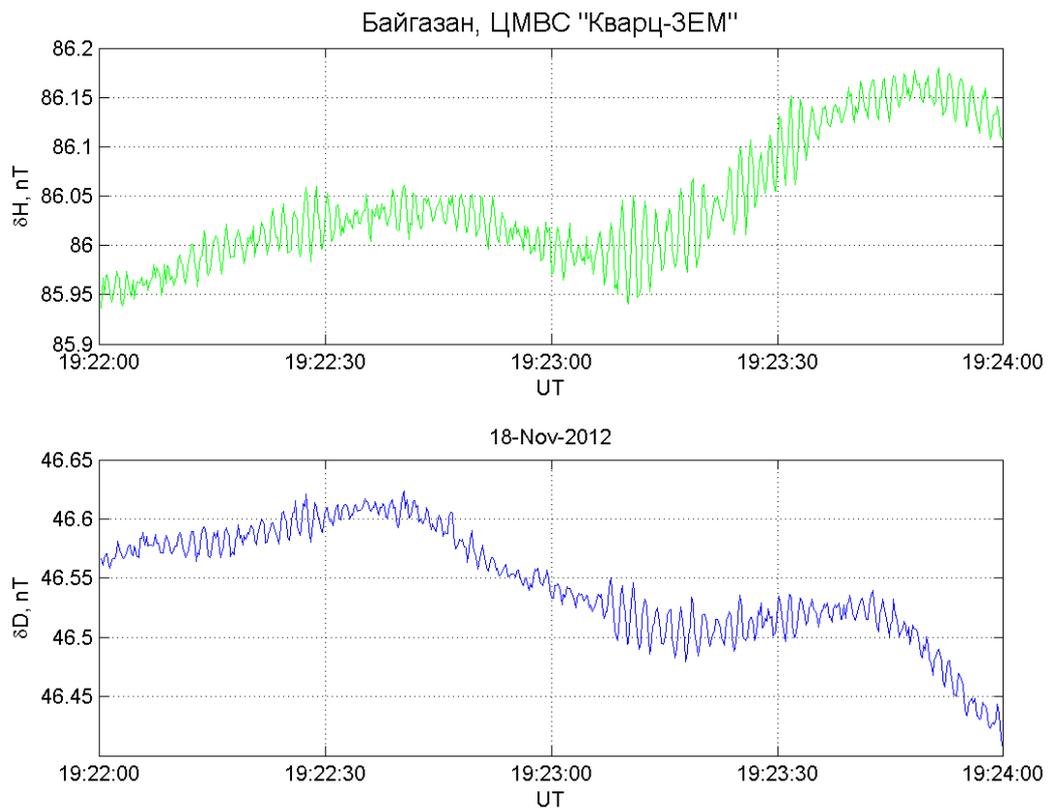


е

Рис.4. (продолжение) Вариации геомагнитного поля за сутки на магнитной станции Байгазан (слева) и спектр горизонтальной компоненты, посчитанный методом Уэлча (справа). Ширина окна сглаживания 2^{14} отсчётов, перекрытие 50%: г – 15 ноября 2012 г. (фаза восстановления), д – 17 ноября 2012 г., е – 18 ноября 2012 г. (4-й день после бури, появление микропульсаций Pc1)



а



б

Рис.5. а- спектральная плотность мощности горизонтальной компоненты геомагнитного поля, построенная методом Уэлча, по данным за 18 ноября 2012 года, промежуток времени с 19:15 по 19:30 UT (ширина окна 2^{10} , перекрытие 50%); б – фрагмент записи геомагнитных вариаций из указанного диапазона времени. Хорошо видны микропульсации класса Pc1 с амплитудой до 0.05 нТл.

На рис. 6 показана динамика спектральной плотности мощности в течение суток 18.11.12 по трём компонентам. Как видно из графиков, около 19 часов UT наблюдаются микропульсации класса Pc1 на частотах 0.6-0.7 Гц при уровне спектральной мощности до 2500 пТл²/Гц (изолиния проведена на уровне 100 пТл²/Гц).

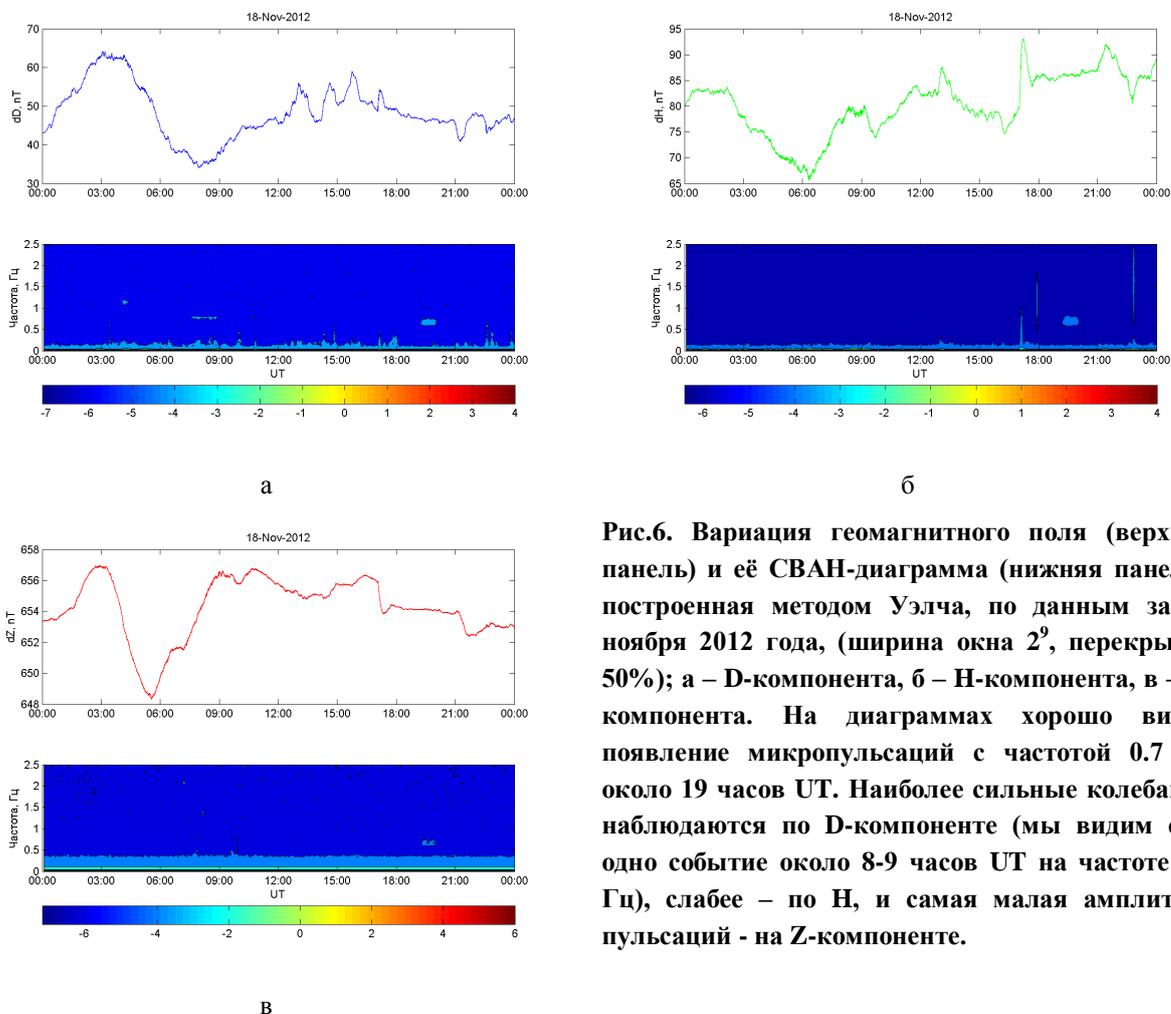


Рис.6. Вариация геомагнитного поля (верхняя панель) и её СВАН-диаграмма (нижняя панель), построенная методом Уэлча, по данным за 18 ноября 2012 года, (ширина окна 2⁹, перекрытие 50%); а – D-компонента, б – H-компонента, в – Z-компонента. На диаграммах хорошо видно появление микропульсаций с частотой 0.7 Гц около 19 часов UT. Наиболее сильные колебания наблюдаются по D-компоненте (мы видим ещё одно событие около 8-9 часов UT на частоте 0.8 Гц), слабее – по H, и самая малая амплитуда пульсаций - на Z-компоненте.

Сравнение результатов измерений на Байгазане с данными скандинавской сети обсерваторий (Килписарви, Ивало, Соданкюля, Рованиеми, Оулу, Нурмиярви - <http://www.sgo.fi/Data/Pulsation/pulData.php>) показало, что в это же время микропульсации Pc1 наблюдались и там (см. рис.7), однако в Нурмиярви (номер оболочки L=3.3) по D-компоненте этих колебаний уже не было, они обнаруживались только в H-компоненте.

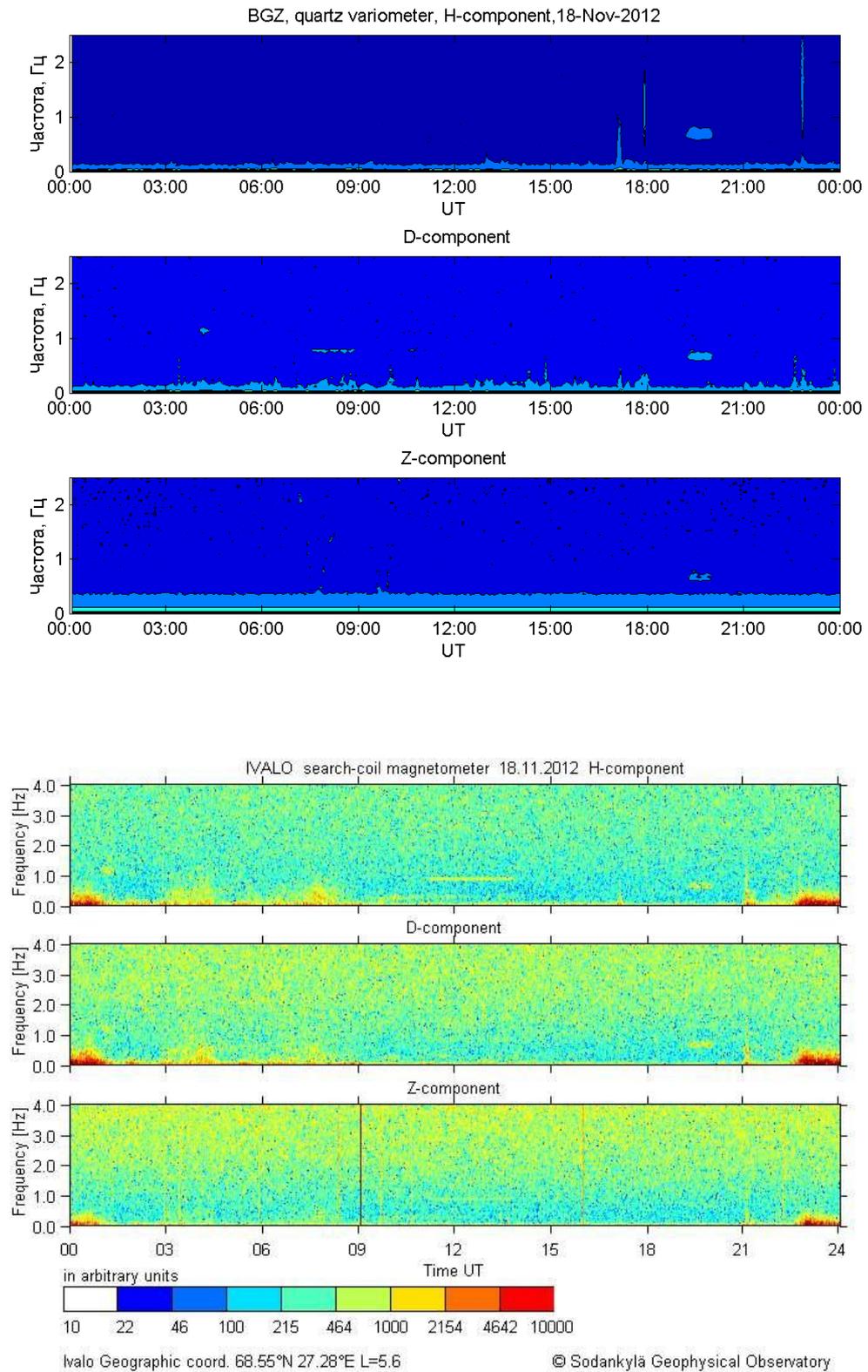


Рис.7. Сравнение СВАН-диаграмм 18.11.12 на Байгазане (а) и в Ивало (б) В обоих случаях наблюдаются микропульсации около 19 часов UT на частоте 0.7 Гц.

Аналогичный анализ был проведён за период с 14 по 19 марта 2012 года. 15 марта началась магнитная буря и к 18 марта геомагнитная обстановка стала слабовозмущенной. Pc1 наблюдались 18 марта с 16 до 22 UT на частоте 0,8 Гц с максимумом между 18 и 19 UT. Таким образом, во время восстановительной фазы, после бури, начавшейся 15 марта, 18 марта (через 3 дня после начала бури) появились пульсации класса Pc1 типа ночью и продолжались до утра, в предутренние часы появились более мощные Pc1 пульсации, но с немного меньшей частотой. 19 марта Pc1 наблюдались между 20:00 и 22:00 UT. На рис.8 видно, что 18 марта микропульсации наблюдались и на скандинавской сети.

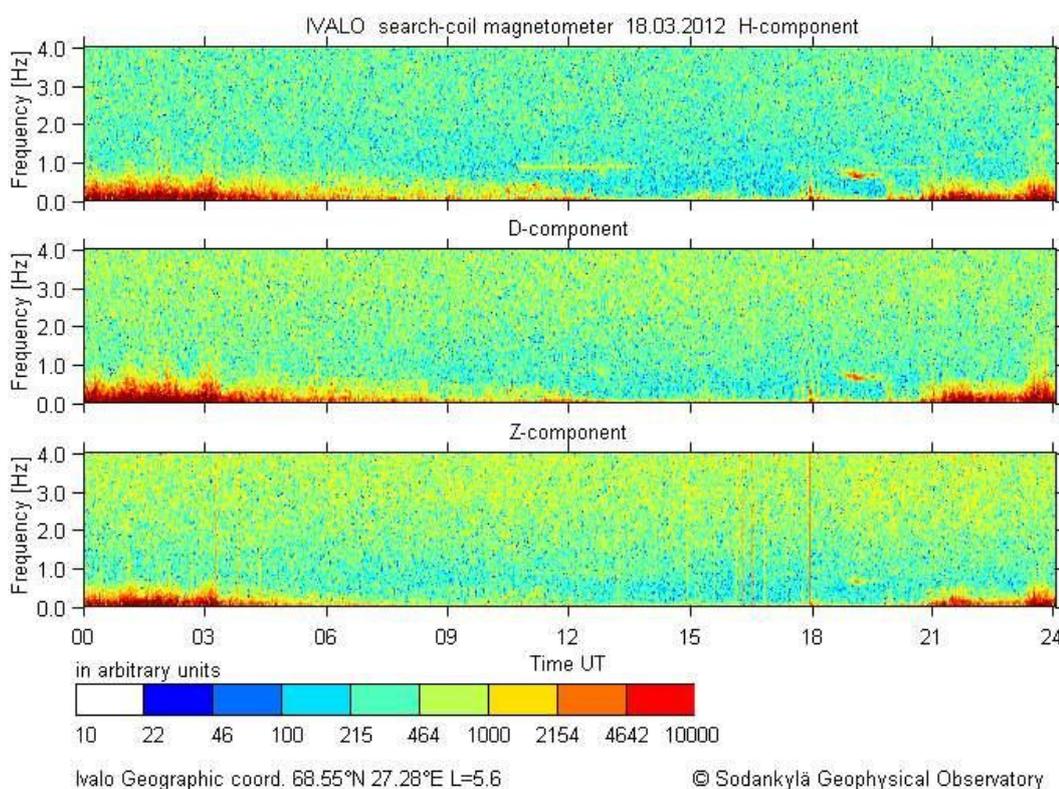


Рис.8. СВАН-диаграмма 18.03.12 в Ивало. Так же, как на Байгазане, наблюдаются микропульсации около 19 часов UT на частоте 0.7 Гц.

3. Оценка температурной стабильности базисных значений кварцевого вариометра по минутным средним

Работы 2012 г. (Исследование..., 2012) показали, что стабильность расчётных базисных значений составляет величину около 1-2 нТл. Возможно, это связано с не совсем корректным учётом температурной зависимости для них: оценка температурных коэффициентов делалась лишь однажды, в октябре 2011 года, во время абсолютных измерений с.н.с. геофизической обсерватории «Ключи» Хомутовым С.Ю. – для проведения таких измерений требуется дорогостоящее оборудование (инклинометр-деклинометр на базе немагнитного теодолита), отсутствующее на нашей станции. Оценку коэффициентов этой зависимости можно провести также по результатам измерений магнитной станции в течение года, когда температура меняется в широких пределах. Ниже приводится такой анализ, выполненный на основе результатов расчёта минутных средних для станции за 2011 гг. (Бакчабаев, Бетёв, 2012).

Чтобы исключить влияние суточной вариации, для анализа использовались данные, полученные в ночное время: зимой в интервале 12-24 UT, что соответствует 18-06 часам локального времени, в апреле и сентябре 14-22 UT, с мая по август - 15-21 UT. Далее эти данные очищались от дней с возмущенной магнитной обстановкой ($K_p > 3$; значения индекса планетарной геомагнитной возмущённости брались с сайта www.spidr.com), однако даже после удаления суточной вариации и возмущенных дней, в ночных данных наблюдались бухтообразные возмущения значительной амплитуды. Для их удаления по целым суткам строилась сглаженная кривая вариации при помощи робастного метода локальной линейной интерполяции Льюиса с окном сглаживания 180 минут (функция `smooth(t, Nm, 180, 'rlowes')` в пакете MATLAB), задавался некоторый уровень отклонения (2.4 нТл для D-, H-компонент и 0.6 нТл для Z-компоненты) и при превышении этого уровня отклонения от сглаженной кривой данные отбрасывались (см. рис.10). Для каждого месяца на основе очищенных данных проводилась

линейная аппроксимация зависимости от температуры (см. рис.11) и рассчитывались значения температурных коэффициентов и средних значений компонент при нулевой температуре. Результаты этих расчётов приведены на рис.12-13. Бросается в глаза сильное изменение температурных коэффициентов с течением времени – вплоть до изменения знака. В целом для D-канала характерны значения, не превышающие $0.5 \text{ нТл}/^\circ\text{C}$ по модулю, в то время, как у H- и Z-каналов они могут превышать $1 \text{ нТл}/^\circ\text{C}$. В зимний период коэффициенты для обоих каналов отрицательны, а в тёплый период наблюдаются близкие нулю, и даже положительные значения. Всё это может свидетельствовать о нелинейности температурной зависимости базисных значений, и, в частности, объяснять дрейф разностей измеренного и рассчитанного значений модуля полного вектора: использовавшиеся температурные коэффициенты были получены в октябре 2011 г. и не соответствовали летним значениям.

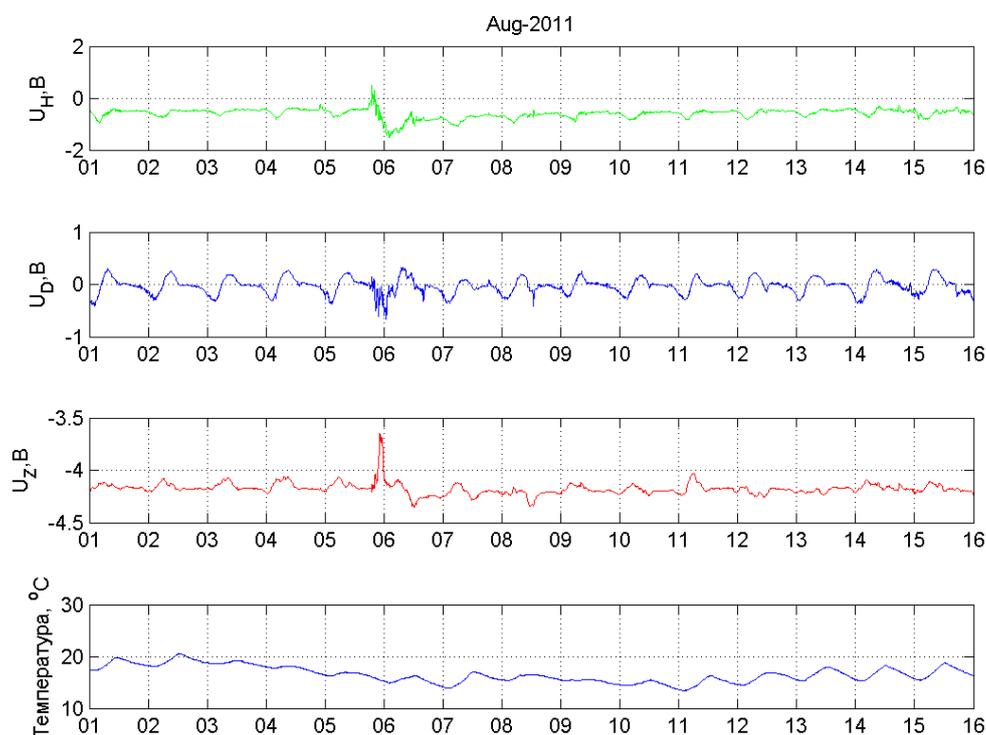


Рис.9. График значений H,D,Z – каналов вариометра (в вольтах) и температуры за август 2011 г. на станции «Байгазан». Заметна магнитная буря 5-6 августа ($K_p=7.8$)

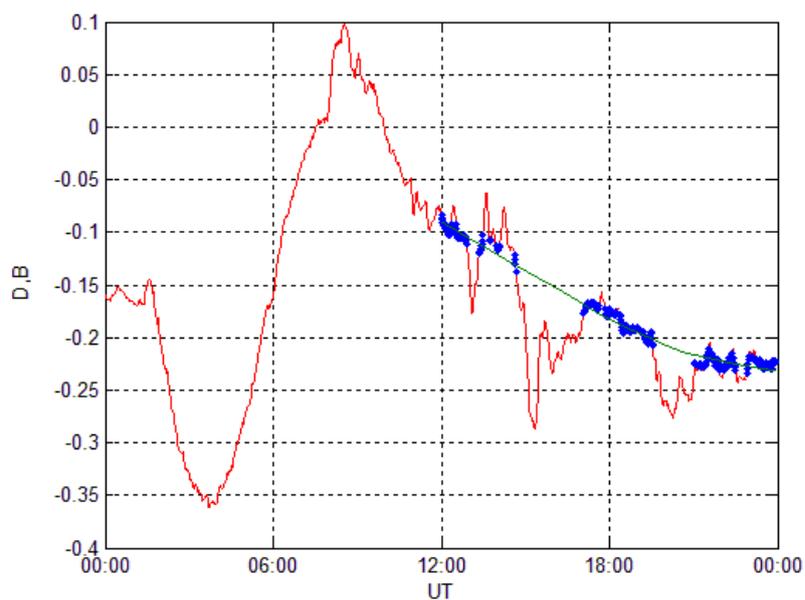


Рис.10. Пример отбрасывания данных полученных во время ночных бухтообразных возмущений при помощи сглаживания. Сглаженная кривая получена робастным методом локальной линейной интерполяции Льюиса с окном сглаживания 180 минут, точки – отобранные данные при полуширине окна отбора 1.2 нТл.

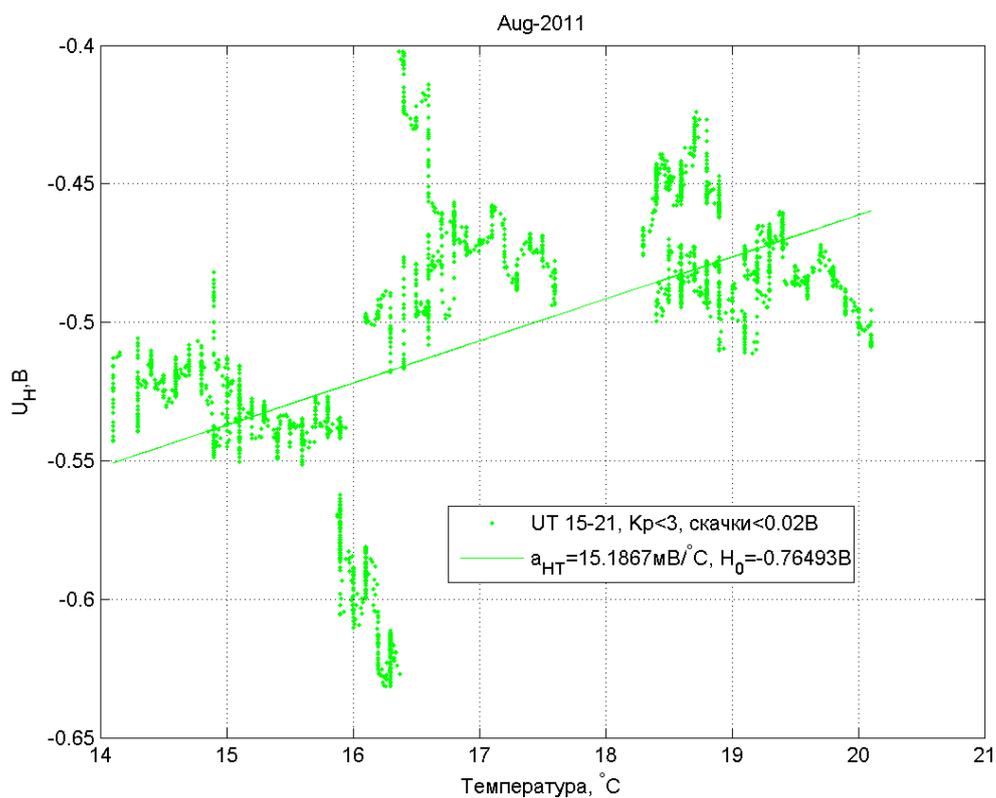


Рис.11. Зависимость очищенных ночных данных для напряжения на Н-канале МВС от температуры за август 2011г.

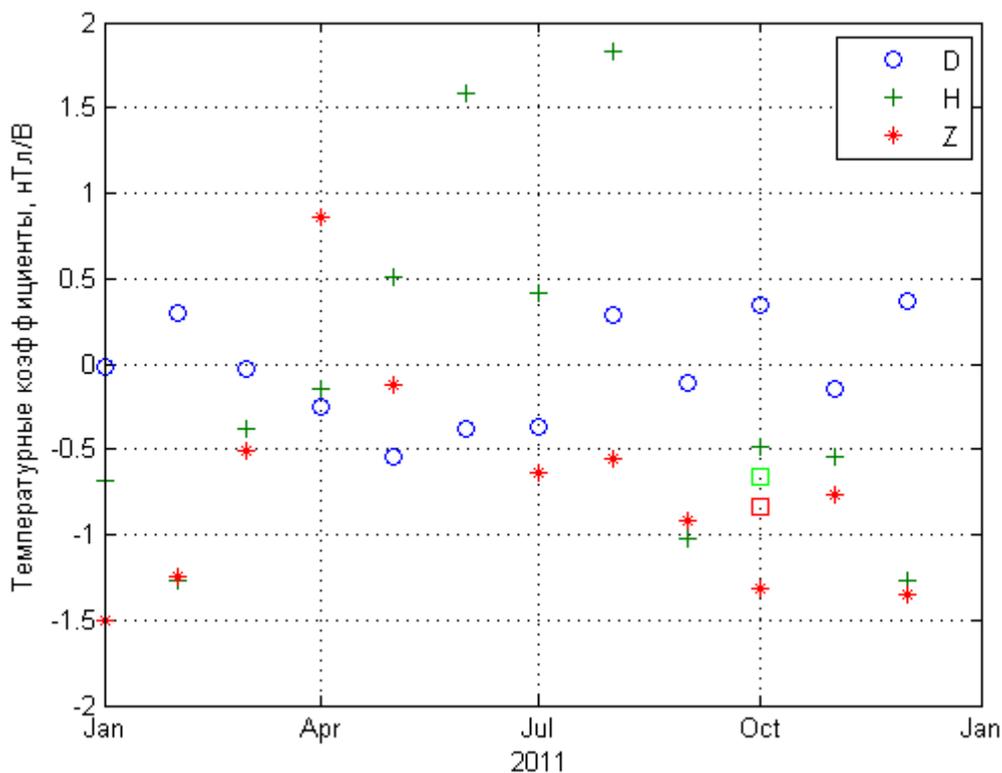


Рис. 12. Зависимость температурных коэффициентов от времени за 2011 г. Квадратами показаны значения, полученные в результате абсолютных измерений.

На рис. 13 показано изменение расчётных средних месячных ночных очищенных значений компонент (относительно базисных) при нулевой температуре за 2011 г. Данные довольно хорошо описываются линейными трендами, показанными на графике прямыми линиями. Скорость изменения компонент за год приведена в легенде. Заметим, что вековая вариация для Байгазана (51.759° N , 87.432° E , высота 460 м) в 2011 г. для горизонтальной компоненты согласно модели международного референтного геомагнитного поля IGRF11 (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>) -42.1 нТл/год (согласно WMM 2010 -35.5 нТл/год), для вертикальной $+35.0$ нТл/год (33.6 нТл/год), для склонения -0.03 градуса/год (-0.04 градуса/год). Таким образом, изменение расчётных средних месячных ночных очищенных значений компонент (относительно базисных) при нулевой температуре происходит быстрее, чем предсказывает модель, что может свидетельствовать о дрейфе базисных значений.

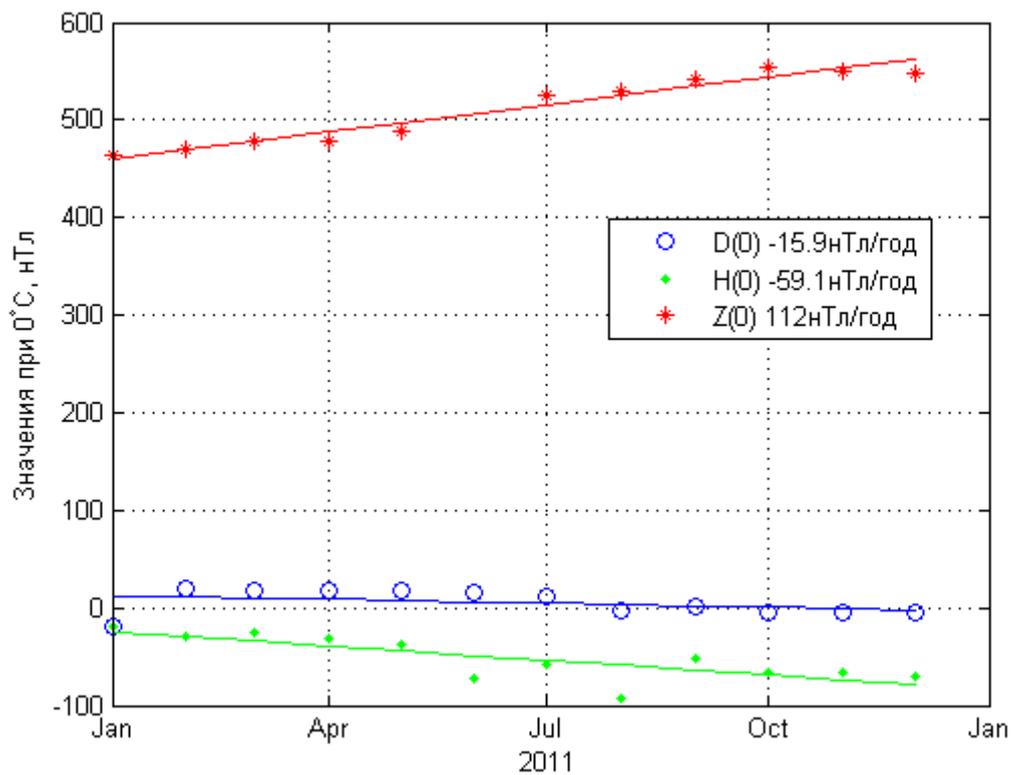


Рис. 13. Зависимость расчётных средних месячных ночных очищенных значений компонент (относительно базисных) при нулевой температуре от времени за 2011 г. Прямыми линиями показана линейная аппроксимация.

4. Сравнение данных станции с результатами измерений на магнитных обсерваториях

Станция «Байгазан» имеет удобное расположение внутри полигона, образованного 4-мя магнитными обсерваториями (МО) сети INTERMAGNET (Алма-Ата, Урумчи, Новосибирск, Иркутск). Важное значение имеет сопоставление данных станции с измерениями на этих обсерваториях за прошлые годы. Это необходимо для выявления региональных особенностей геомагнитных вариаций на территории Горного Алтая, также эта работа является подготовительным этапом для совместного анализа вариаций на станциях Алтае-Саянского региона для расчёта токовых функций в ионосфере над ним и магнитовариационного зондирования литосферы региона.

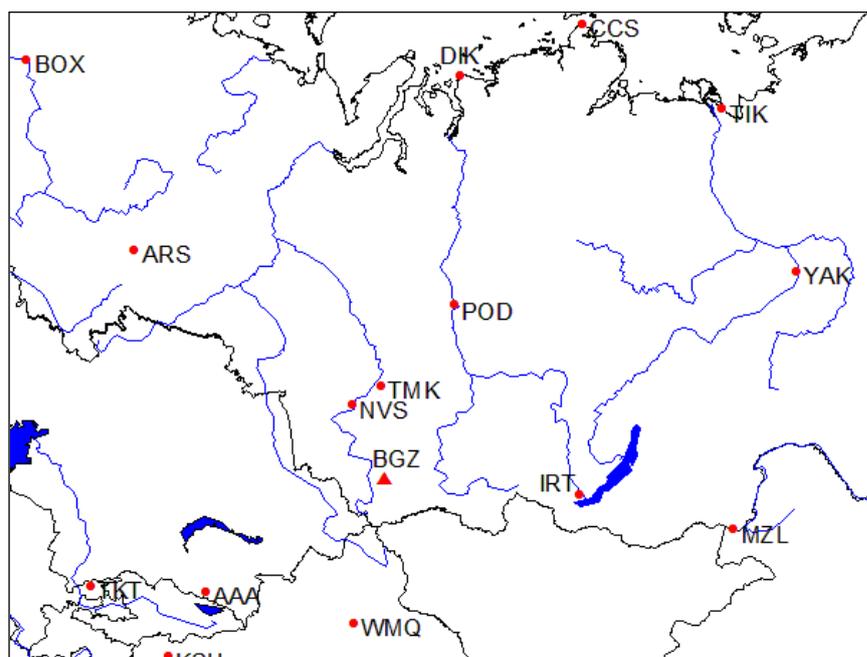


Рис.14. Расположение станции Байгазан (BGZ) относительно магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET (AAA, BOX, IRT, NVS, WMQ, YAK) и обсерваторий IAGA (ARS, DIK, CCS, POD, TIK, TMK);

Данные МО были загружены с сайта INTERMAGNET (www.intermagnet.org) и представляли собой текстовые файлы в формате Международного совета по геомагнетизму IAGA-2002. Файлы содержали значения горизонтальной компоненты, склонения (либо северной и восточной компонент), вертикальной компоненты и полного вектора с

разрешением в одну минуту (минутные средние). Данные МО «Ключи» (Новосибирск) были любезно представлены нам С.Ю.Хомутовым в виде mat-файла.

Данные загружались при помощи специальных скриптов, разработанных С.Ю.Хомутовым, в матпакете MATLAB. В данных Алма-Аты встречались пропуски, обозначенные как 99999. Они заменялись на безчисловое значение NaN.

Были проблемы с данными с магнитной обсерватории Урумчи: за некоторые дни указывались не значения компонент, а только данные вариометров (относительно базисных). Эти дни находились вручную, и на их границе в 24:00 образовывался скачок, равный разности значений компонент в соседние дни, который давал приблизительные оценки базисных. Были получены следующие результаты

Таблица 2.

Значения базисных на магнитной обсерватории Урумчи, рассчитанные по скачку приводимых в файлах значений компонент на границе суток

Год	Месяц	День	H, нТл	D, угл.мин	Z, нТл
2011	1	15	24914.1	163.68	50779.3
2011	1	22	24914.7	163.72	50779.2
2011	1	26	24914.4	163.72	50779.8
2011	4	4	24917.4	163.85	50779.8
2011	4	9	24917.2	163.96	50778.5
2011	6	27	24917.3	163.68	50777.4
2011	7	5	24915.6	163.63	50778.4
2011	7	22	24915.7	163.68	50777.5
2011	8	17	24915	163.68	50778.2
2011	10	3	24917.5	163.81	50777
2011	10	22	24917.8	163.12	50777.2
2011	11	19	24918	163.41	50776
2011	12	16	24919	163.64	50775.4

По этим данным также были построены графики для изучения зависимости базисных от времени, которые приведены на рис.12. Из них видно, что размах изменения базисных магнитного склонения за год не превышал 0.6 угловой минуты (4 нТл), для H-компоненты наблюдался положительный немонотонный дрейф на 6 нТл, для Z-компоненты – отрицательный монотонный дрейф на 5 нТл. По имеющимся точкам были построены аппроксимирующие полиномиальные кривые при помощи функции MATLAB polyfit(). Разброс точек вокруг них составляет величину около 1-2 нТл.

Все эти базисные значения сохранялись в текстовый файл для более удобной обработки. А в дальнейшем при обработке данных базисные значения для МО «Урумчи» брались из подготовленного файла. Также программа сохраняла номера этих дней для дальнейшей обработки.

По полученным данным были построены графики зависимости компонент поля на 4 МО и станции «Байгазан» от времени для каждого дня (рис.16). Для северной и восточной компонент в целом наблюдается схожая динамика, несколько отличающаяся из-за места расположения пункта измерений. Например, можно видеть, что суточная вариация начинается раньше всего в Иркутске, а позже всего в Алма-Ате - это хорошо прослеживается в графиках за летний период. В динамике Z компоненты заметны заметные различия от станции к станции на фоне довольно небольшой амплитуды вариации (в Новосибирске, кроме того, наблюдаются заметные шумы). Вариация на Байгазане ближе всего к кривым Новосибирска. Различия эти в основном связаны с амплитудой суточной вариации, которая максимальна в Алма-Ате и минимальна в Иркутске. Кроме того, заметен различный характер кривой вариации в Алма-Ате и в Алтае-Саянском регионе (в последнем случае он имеет более сложный характер

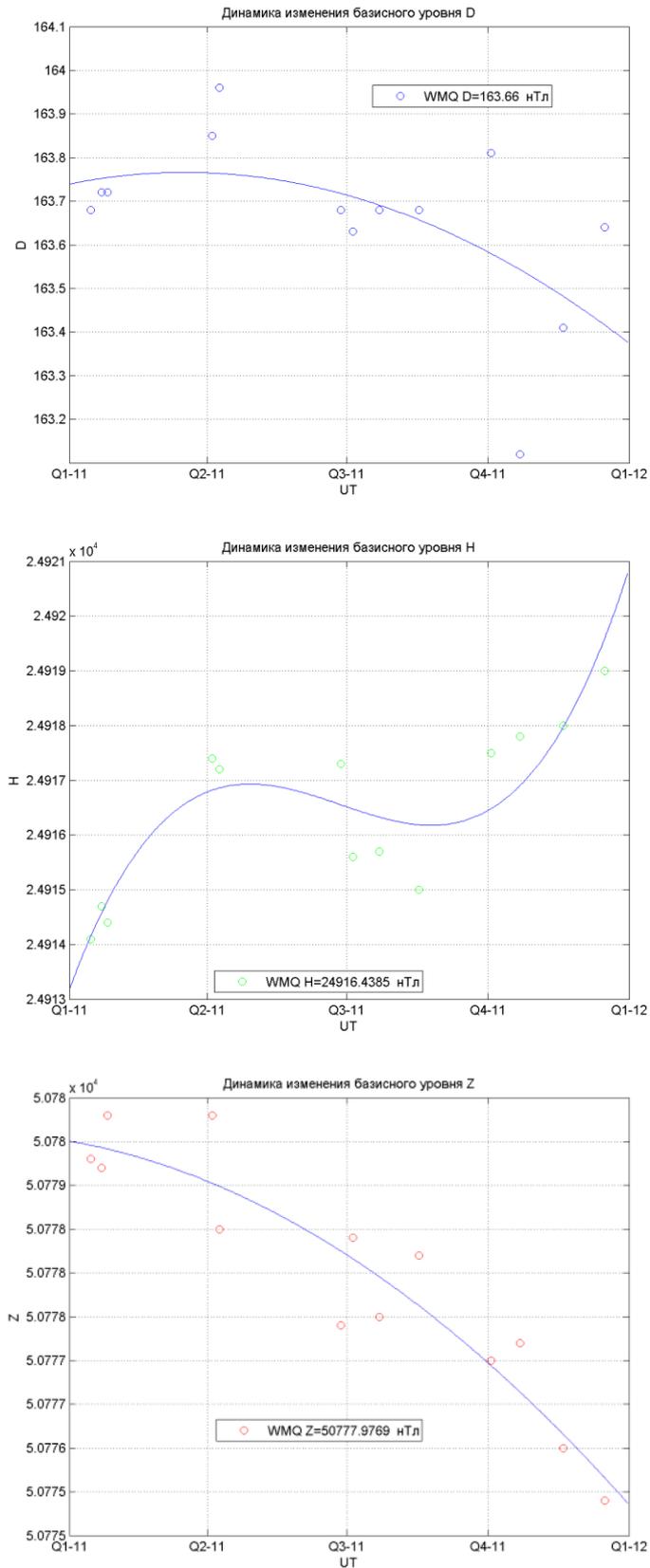
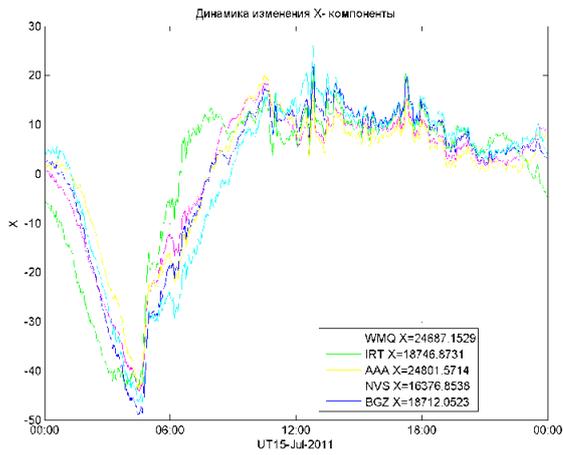
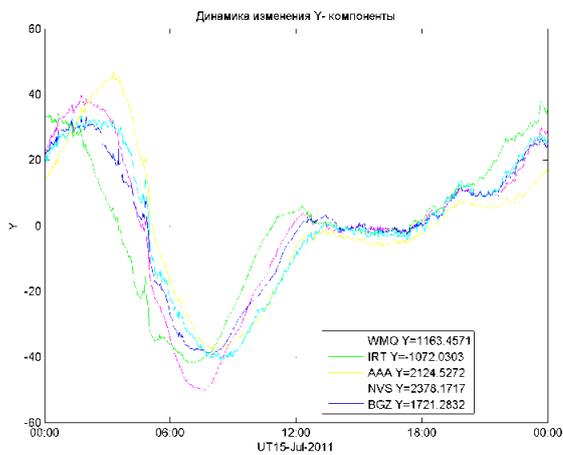


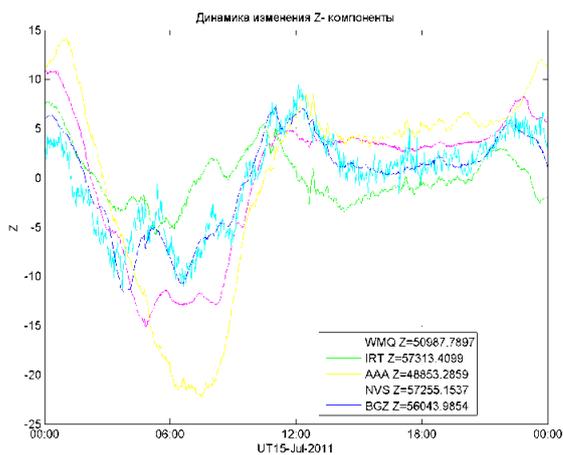
Рис 15. Изменения базисных значений вариометров на магнитной обсерватории Урумчи за 2011г. Кривыми показана аппроксимация полиномом



а



б



в

Рис.16. Пример сравнения невозмущенных вариаций компонент поля на магнитных обсерваториях, прилегающих к Алтае-Саянскому региону за 15.07.2011 г.: а – северная, б – восточная, в – вертикальная. В легенде приведены среднесуточные значения компонент для каждого пункта измерений.

На рис.17 показан пример синхронности вариаций с периодом около 30 минут в ночном секторе на различных пунктах измерений во время относительно невозмущённой магнитной обстановки, а на рис.15 мы видим весьма различное поведение динамики компонент поля во время сильной магнитной бури 5-6 августа. В этом случае амплитуда изменения вертикальной компоненты растёт к северу, принимая минимальные значения в Урумчи и Алма-Ате (около 20 нТл) и максимальные – в Новосибирске (120 нТл). В динамике восточной компоненты, создаваемой меридиональными ионосферными токами, заметно отличается Иркутск.

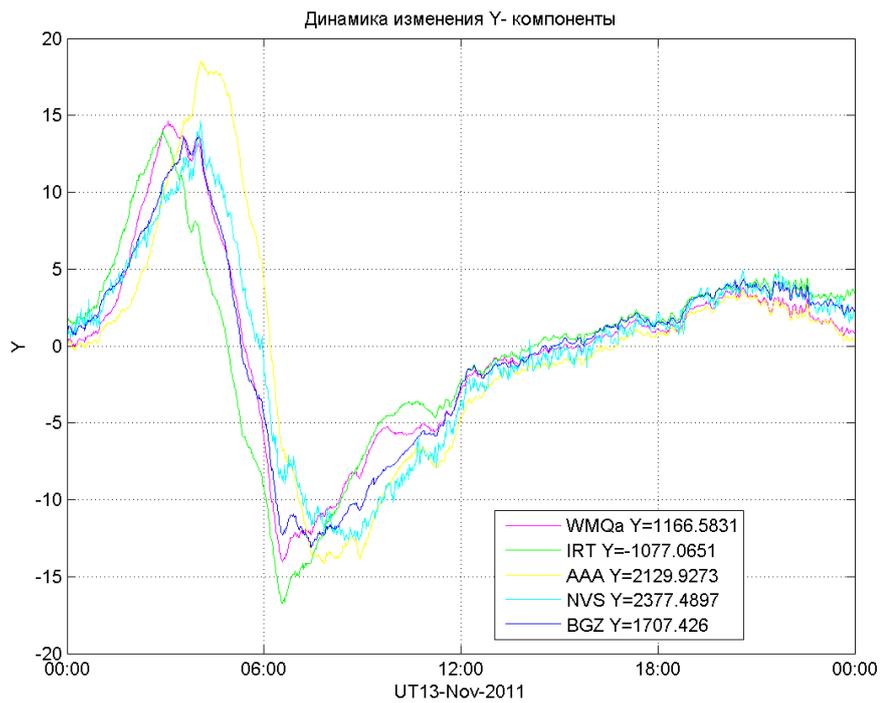
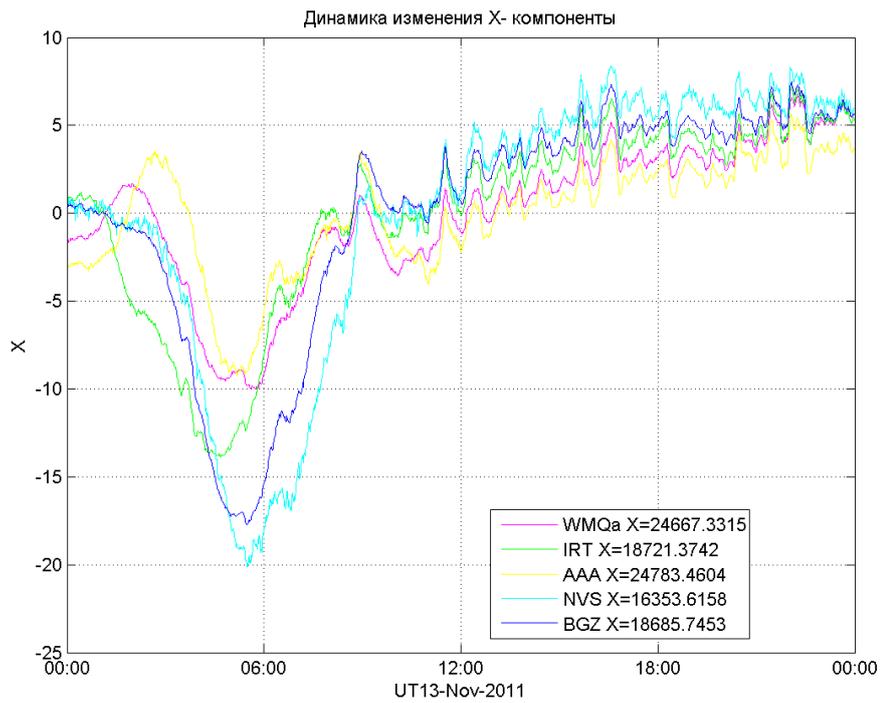


Рис.17. Пример синхронности изменения горизонтальной компоненты на магнитных обсерваториях Алтае-Саянского региона в ночном секторе

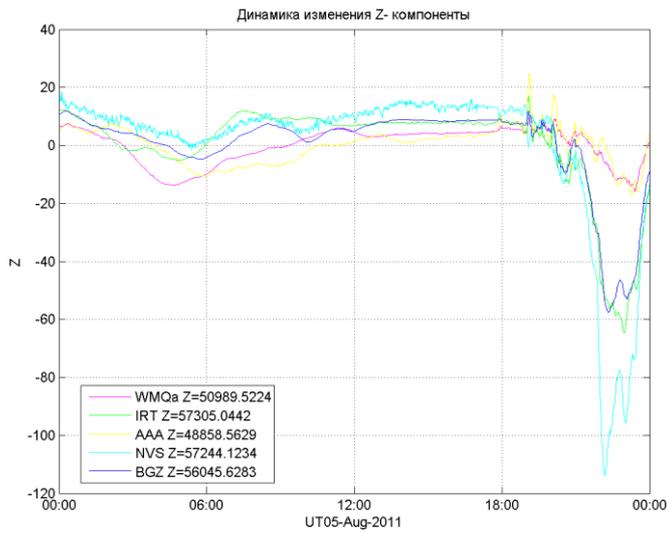
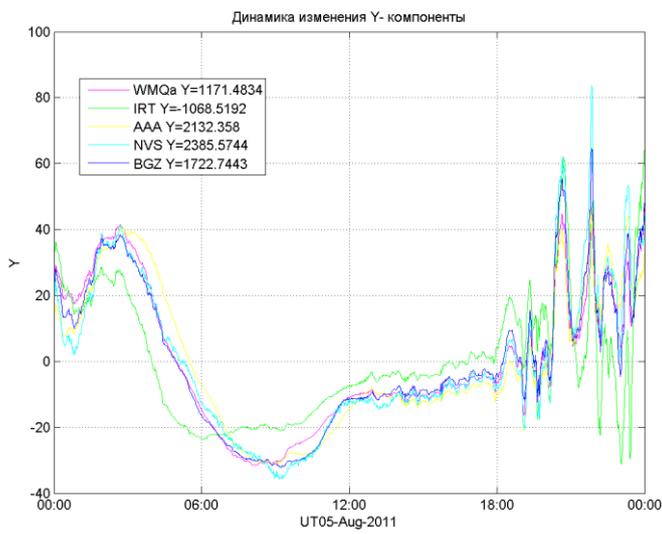
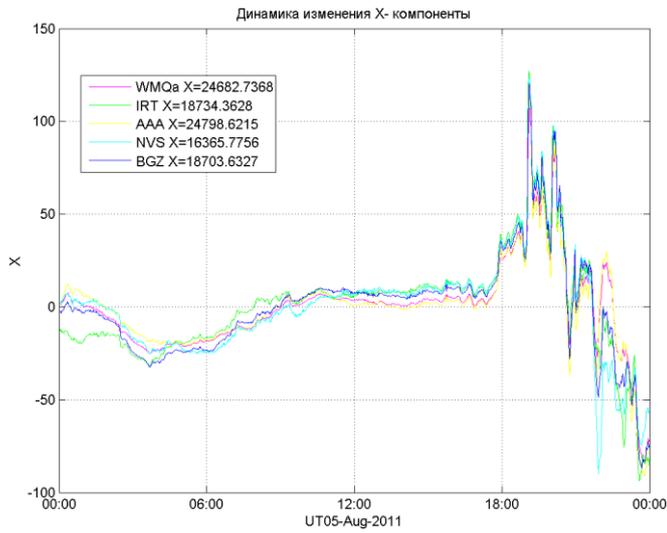


Рис 18. Одна из сильнейших бурь 2011г. в ночь 5-6 августа

5. Расчёт суточной вариации на станции Байгазан

В международной практике принято оценивать геомагнитную возмущённость по индексам геомагнитной активности. К-индекс оценивается по отклонению D-, H- компонент от кривых суточной вариации за трёхчасовой период, и величине этого отклонения в зависимости от геомагнитной широты магнитной станции (обсерватории) ставится в соответствие определённое значение индекса [Заболотная, 2007, с.40-43]. Например, для широты 36-57° таблица соответствия приведена ниже

Таблица 3.

К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
нТл	0-5	5-10	10-20	20-40	40-70	70- 120	120- 200	200- 330	330- 550	500>

Невозмущённым условиям соответствуют значения К=0-3,

слабовозмущённым К=4, магнитной бурей считается возмущение при К=5 и выше. Для расчёта К-индекса необходимо знать спокойную суточную вариацию для станции, которая рассчитывается для каждого месяца по 5 самым магнитоспокойным дням. Рассчитывается среднее значение для каждого часа местного солнечного времени [Паркинсон, с.333-335].

На магнитной станции «Байгазан» ведутся магнитные измерения с декабря 2009 г., однако оценок индексом геомагнитной возмущённости и расчётов суточной вариации для неё ещё не проводилось. Цель этой работы – восполнить это пробел.

Методика расчётов

Для определения магнитоспокойных дней были использованы значения К-индекса, загруженные с сайта <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>. Программа, написанная в пакете MATLAB, загружала данные со станции «Байгазан» за 2011 г. и значения К -индекса. Чтобы найти магнитоспокойные дни, вычислялась сумма значений К-индекса за один день (сами значения

представлены для каждого 3 часового интервала, за сутки получается 8 значений), далее производилась сортировка, в результате выбирались 5 дней с наименьшими суммами. По этим дням программа высчитывала значения компонент и сохраняла их в память.

Брались минутные данные за день, они сглаживались в двухчасовом окне робастным методом Льюиса при помощи оператора MATLAB `smooth(Xbk5,120,'rloess')`, чтобы убрать нежелательные скачки поля, вызываемые, как правило, бухтообразными возмущениями. Следующим шагом находили среднее значение за 1 минуту за каждый день, а сами данные на станции записываются каждую секунду. Такие усреднения проводились за каждый магнитоспокойный день. В результате получалось 5 массивов поминутных данных за каждый день, которые потом усреднялись за каждую минуту каждого дня. По полученным данным были построены график вариаций трёх компонент за каждый месяц (пример – на рис.19-20). К сожалению, наличие ночных возмущений привело к наличию скачков в ночном секторе, которые довольно заметны в зимние месяцы.

Зная суточную вариацию для каждого месяца, можно посчитать значения К индекса как отклонение от суточной вариации. Для этого данные со станции усреднялись поминутно. Потом находилось разность между суточной вариацией и данными от станции. Полученные разности группировались по 3-х часовым интервалам, и находилось их разность между минимальным и максимальным отклонениям. Далее программа по таблице 1 находила, какому индексу соответствует значения отклонения. Для проверки полученных значений был построен график сравнения между полученными данными на станции «Байгазан» и данными с сайта <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> за февраль (рис.21)

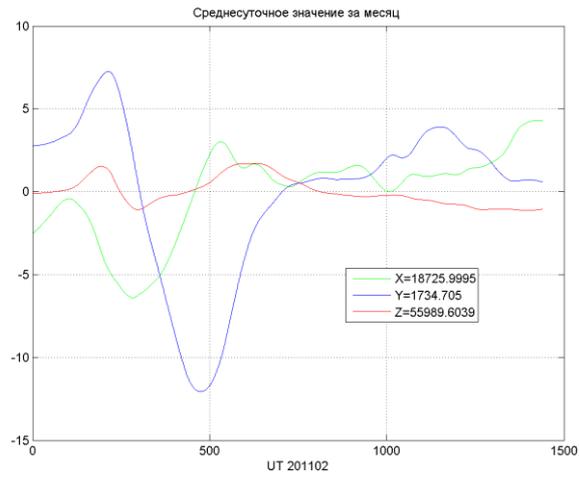


Рис.19 Суточная вариация за февраль (амплитуда не очень большая, поэтому хорошо видны скачки)

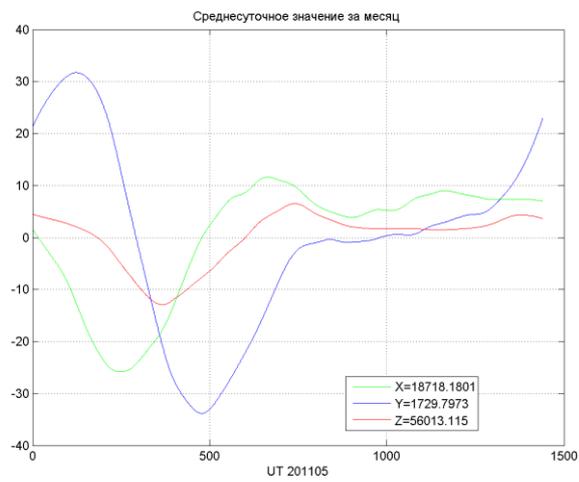


Рис 20. Суточная вариация за май (амплитуда вариации почти 2 раза, больше поэтому скачки не так заметны)

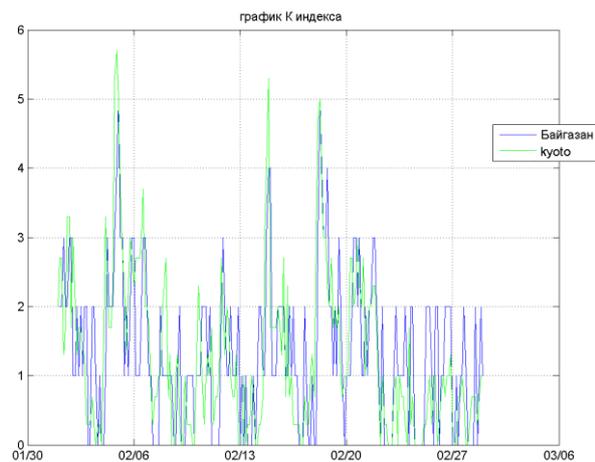


Рис 21. График сравнения между полученными данными на станции «Байгазан» и данными с сайта <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> за февраль.

7. Разработка индукционного магнитометра на базе датчика ИНТ-1

В геофизике большое внимание уделяется исследованию микропульсаций магнитного поля Земли. Данные микропульсации являются проявлениями процессов происходящих в ионосфере и внутри Земли. Амплитуда таких микропульсаций зачастую не превосходит 0.01 нТл. Для регистрации микропульсаций применяются магнитометры способные проводить точные измерения магнитного поля, с шумом не более 0.01 нТл, и частотой не менее 10 Гц. Приборы, основанные на датчиках индукционного типа, очень хорошо подходят для таких исследований. Индукционный датчик представляет собой многовитковую катушку с пермалловым сердечником, которой позволяет усилить переменное магнитное поле, проходящее через витки катушки. В институте солнечной земной физики СО РАН в 1985 был разработан индукционный нанотеслометр ИНТ-1, обладающий чувствительностью 0.005 нТл. Технической особенностью данного прибора является отсутствие возможности наблюдения микропульсаций во всем диапазоне измеряемых частот, а также невозможность вести синхронизированные с UTC измерения и производить запись на цифровой носитель, что делает нанотеслометр неудобным для использования в геофизических обсерваториях. Задача данной работы – разработка электроники для датчика ИНТ-1, позволяющей установить датчик в обсерватории на кордоне Байгазан, оз. Телецкое. На рис 22 представлена блок-схема разработанного устройства.

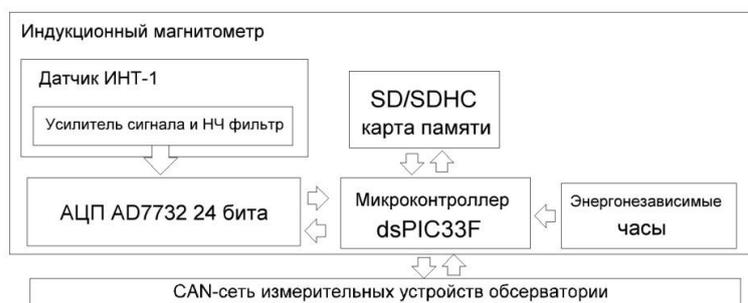


Рис 22. Блок-схема индукционного магнитометра

На первом этапе в лаборатории робототехники Горно-Алтайского государственного университета разработан дифференциальный усилитель сигнала с первичным активным аналоговым фильтром второго порядка.

Датчик имеет активное сопротивление 24 кОм, то есть среднеквадратичная величина напряжения шума для полосы пропускания от 0.1 до 100 Гц равна $200 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, что соответствует 1.2 мкВ в пике. В соответствии с приведенными расчетами использован операционный усилитель AD8599 с пиковым шумом 100 нВ, который на порядок ниже теплового шума, что позволяет не вносить шум усилителя в исследуемый сигнал. На плате усилителя присутствует аналоговый термодатчик для контроля температуры внутри датчика. Плата усилителя смонтирована внутрь датчика для минимизации шума возникающего при передаче сигнала на вход усилителя.

На втором этапе был разработан регистратор с 24/16-битным АЦП AD7732, энергонезависимым источником реального времени и энергонезависимой сменной памятью (MMC/SD/SDHC флеш карта). В качестве центрального управляющего устройства использован цифровой сигнальный контроллер dsPIC33F, на котором предполагается реализовать цифровой фильтр низких частот для устранения различных шумов. Регистратор оснащен приемо-передающим модулем CAN для подключения геофизическому измерительному комплексу (CAN сеть) [Кудрявцев и др.,], развернутому в обсерватории на кордоне Байгазан. Привязка измерений к всемирному времени UTC выполняется средствами приборов подключенных к CAN сети и оборудованных GPS приемниками.

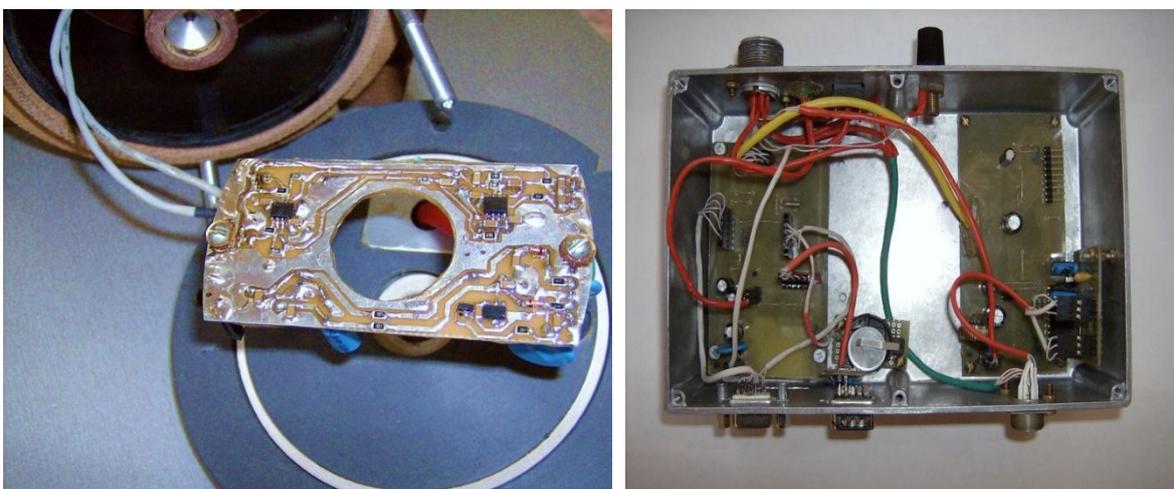


Рис. 23. Плата усилителя (слева) и регистратор (справа) для индукционного магнитометра



Рис. 24. Калибровка и тестирование датчика ИНТ-1 на кордоне Байгазан.

8. Абсолютные наблюдения на станции

В октябре 2013 г. было запланировано выполнить абсолютные измерения специалистами Геофизической обсерватории "Ключи" АСФ ГС СО РАН (Новосибирск). Работы были выполнены с 19 по 21 октября 2013 г.

8.1. Аппаратура и условия измерений

Сотрудниками ГО "Ключи" были привезена следующая аппаратура для проведения магнитных измерений:

1) DI-магнитометр ЗТ2КП №32150 – прибор используется на обсерватории как дополнительный при регулярном мониторинге магнитного поля, а также как возимый при сверках и полевых измерениях. Регулярные наблюдения D,I с его помощью и сравнение со штатным DI-магнитометром ЗТ2КП №32164 показывают, что привезенный на Байгазан магнитометр не имеет значимой систематической погрешности, а по случайной погрешности его результаты сравнимы с основным прибором обсерватории. В комплект входит сам

теодолит с феррозондовым датчиком, закрепленным на зрительной трубе, электронный блок со стрелочным нуль-индикатором, удлинительный кабель, светофильтр (чтобы при необходимости можно было выполнить наблюдения Солнца), ЗИП.

2) оверхаузеровский (протонный) магнитометр POS-1 №105 в обсерваторской комплектации: сам датчик, электронный блок, соединительный кабель (3 м) между датчиком и ЭБ, кабель связи с компьютером через СОМ-порт (по нему же обеспечивалось питание) длиной 30 м, аккумулятор 12В, 17 А×час.

3) нетбук Asus EeePC 900 со штатной программой регистрации POS Manager. Во время измерений нетбук работал от внутренней батареи. Во всех случаях перед началом измерений таймер нетбука устанавливался вручную по времени GPS-навигатора, а таймер POS-1 – с помощью штатной синхронизации программы POS Manager.

4) оверхаузеровский (протонный) магнитометр POS-1 №285 (прибор ГАГУ) Погода был благоприятной – солнечной и сухой. Температура по утрам опускалась до -6°C . Фото общего плана всей аппаратуры на магнитной станции представлено на рис.25.



Рис.25. Общий вид аппаратуры и строений на магнитной станции "Байгазан" в октябре 2013 г.

8.2. Калибровка ЦМВС

Калибровка ЦМВС была выполнена 20 октября Гвоздаревым А. (сотрудник ГАГУ).

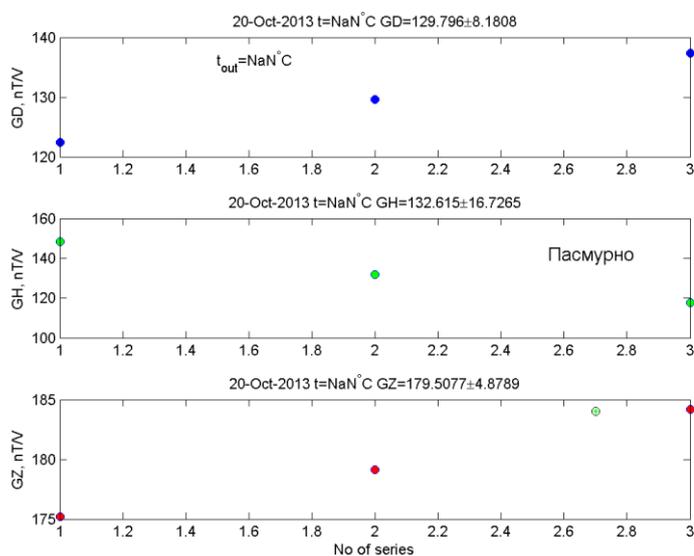


Рисунок 26. Исходные данные калибровки 20 окт. 2013 г.

8.3. Пространственный градиент F между столбами

Другим важным параметром, необходимым для абсолютных измерений, является пространственный градиент между пунктом (столбом) непрерывных измерений F и другим пунктом, к которому необходимо редуцировать удаленные измерения F.

Наиболее оптимальный метод – определение градиента при сверке двух магнитометров. Определение градиента между столбами №2 (DI) и №3 (F) было сделано 21 октября (около 05UT). По 4 измерениям было определено значение градиента

$$F(\#2) - F(\#3) = -4.42 \text{ нТл}$$

В октябре 2011 г. аналогичные измерения дали значение градиента -4.5 нТл.

В октябре 2012 г. аналогичные измерения дали значение градиента -3.3 нТл.

Так как 20 октября POS №285 не работал, а POS №105 был расположен на т.№5, необходимо было определить градиент между ст.№2 и ст.№5.

Т.к. 19 октября одновременно работали POS №285 (ст.3) и POS №105 (ст.5), были взяты отсчеты в одно и то же время по обоим приборам и вычислены разности (21 измерение). Результаты приведены ниже

Среднее значение dF_{grad} (ст.3-т.5)=-7.03 нТ, СКО=0.03

Таким образом, можно принять следующие значения пространственных градиентов для октября 2013 г.:

$$F(\#2) - F(\#5) = -11.45 \text{ нТл}$$

т.е. для приведения непрерывных F-измерений на столбах №3 и №5 к столбу №2 необходимо использовать выражения (поле F на DI-столбе имеет более низкое значение):

$$F(2) = F(3) - 4.42$$

$$F(2) = F(5) - 11.45$$

8.4. Абсолютные измерения на станции "Байгазан"

Абсолютные DI-наблюдения в 2013 г. были выполнены с помощью магнитометра ЗТ2КП №150. DI-измерения были выполнены 19 (3 серии к вечеру), и 12 серий 20 октября. Время отмечалось по часам GPS-навигатора. Во всех случаях в качестве репера выбиралась Мира №1 с азимутом 204°09'07" (определенному в октябре 2012 г.). 21 октября 2013 года также была проведена работа по определению азимута миры, полученное значение совпало с азимутом 2012 года.

Основные моменты, относящиеся к абсолютным DI-измерениям:

1) столб немного шатался при хождении вокруг него, а также при сильных порывах ветра (обычно – со стороны озера);

2) при прямом освещении Солнцем и при резком изменении температуры (вечером после заката и утром после восхода) могла сбиваться нивелировка теодолита, а сам уровень уходит из-за температурных градиентов

Других особых замечаний не было, критических или значительных проблем – тоже не было.

Обработка выполнена стандартно, как на обсерватории "Ключи" и как делалась в 2010-2012 гг. на Байгазане (Бакчабаев и др., 2013). Данные были набраны в файлы (по суткам). Вычисление D, I выполнено с помощью специальных программ в пакете MATLAB. Результаты представлены на рис.27

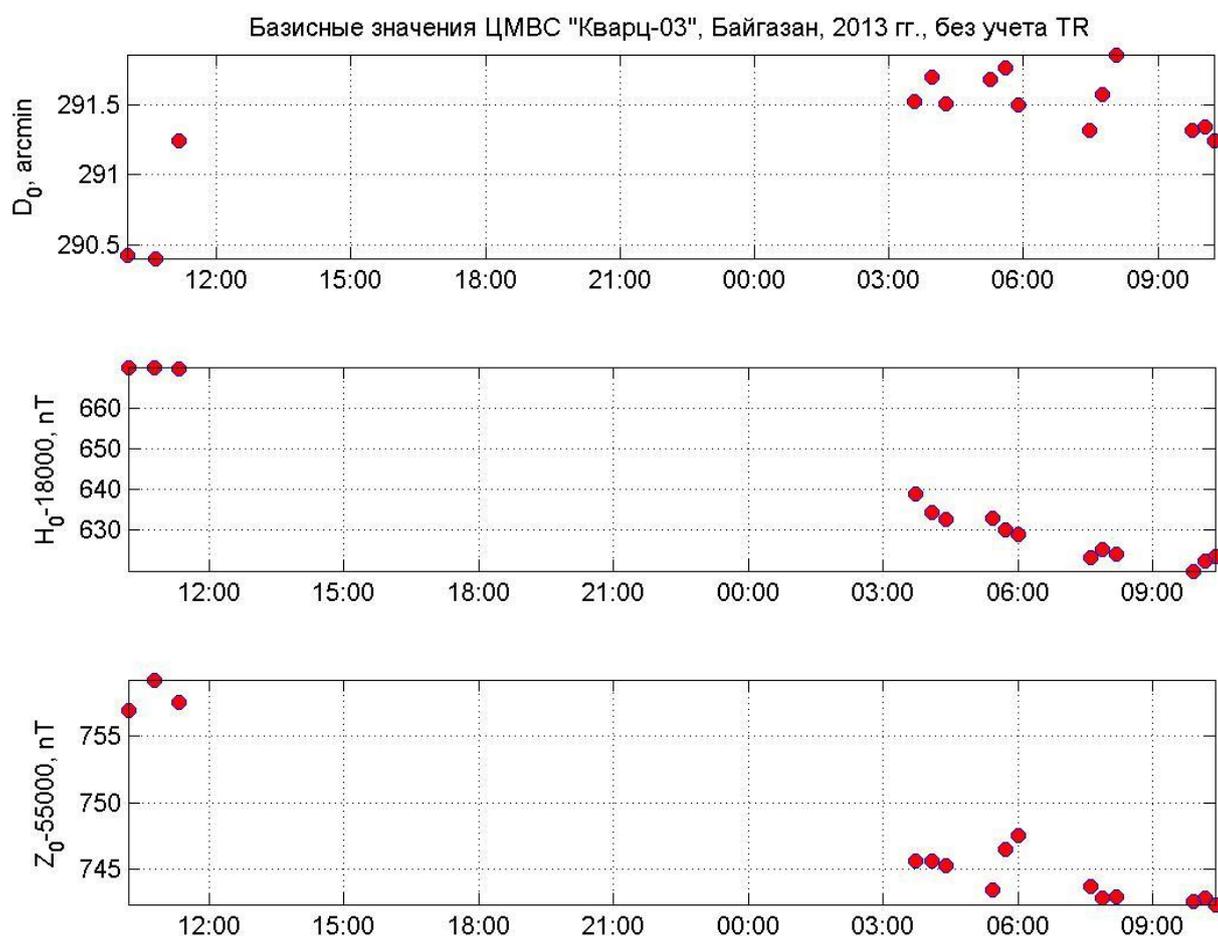


Рис.27. Базисные значения ЦМВС по абсолютным измерениям в октябре 2013 г.

Разброс 20 октября по D_0 не превышает 20 сек., по H_0 – 20 нТл, по Z_0 – 5 нТл. Такой разброс можно объяснить неопытностью наблюдателей, в

особенности это проявляется при работе в полевых условиях, к каким можно отнести условия на Байгазане.

Причина значительного отличия базисных 19 октября и 20 октября, скорей всего, лежит в некомфортных условиях работы (наблюдатели только что приехали, уже темнело). Но, возможно, сказался и тот факт, что градиент между т.5 (место работы POS№105) и основным ст. 2 не был определен непосредственно, как в случае 21 октября при определении градиента между ст.№2 и ст. №3.

8.5. Выводы

По результатам магнитных измерений и дополнительных работ на станции "Байгазан", выполненных 19-21 октября 2013 г. получено следующее:

- 1) по астрономическим наблюдениям Солнца определено значение азимута миры **204°09'07"**
- 2) выполнено 15 определений полного вектора магнитной индукции (в абсолютном смысле), получены базисные линии для ЦМВС без учета температурной зависимости. Средние значения за 19-20 октября составляют: **D0=4° 51' 22"**, **H0=18637.23 нТ**, **Z0=55743.0 нТ**
- 3) рассматривались значения, определенные только 20 октября 2013г.

9.Измерение магнитных вариаций в различных пунктах мониторинга на территории Горного Алтая

В течение экспедиционных сезонов 2008-2012 гг была заложена сеть пунктов мониторинга геомагнитных вариаций на территории Горного Алтая в Усть-Коксинском, Онгудайском, Улаганском, Кош-Агачском районах. В 2013 г. в ходе экспедиционных работ в июле и августе на этих пунктах повторно регистрировались вариации геомагнитного поля при помощи процессорного оверхаузеровского магнитометра POS-1 (разработка лаборатории квантовой магнитометрии Уральского федерального университета, отсчётная точность 1 пТл, погрешность единичного замера до 0.01 нТл) и феррозондового магнитометра МФ-03Р (разработка ИЗМИРАН, отсчётная точность 1 нТл). При помощи POS-1 измерялись вариации полного вектора магнитной индукции геомагнитного поля с периодом от 1 до 5 с, при помощи МФ-03Р – вариации горизонтальной компоненты поля с периодичностью 1 с и магнитного склонения с периодичностью 2 с. Информация об этих работах представлена в таблице ниже.

Дата начала и окончания замера	Район проведения исследования, комментарии
1	2
18 июля 07:13 18 июля 11:31	Онгудайский район, территория Башадарских курганов, координата (1:9). F –вариация, H- вариация.
18 июля 12:31 19 июля 10:47	Там же
19 июля 12:29 20 июля 13:22	Там же
20 июля 13:23 20 июня 17:18	Там же
20 июня 17:48 21 июня 01:31	Там же

1	2
22 июня 08:10 23 июня 10:04	Усть-Коксинский район, Молниебойный хребтик. Координата (27:5). F –вариация, H- вариация.
23 июня 10:06 24 июня 08:35	Там же
25 июня 00:06 25 июня 05:15	Там же
3 августа 07:48 4 августа 01:26	Кош-Агачский район, «Тюте», ущелье находящее в 4-8 км от «Ак-Тру». F –вариация, D- вариация.
4 августа 13:24 5 августа 13:37	Кош-Агачский район, около 500м от туристической перевалочной базы близ г. Ак-Тру. F –вариация, D- вариация.
6 августа 00:17 6 августа 23:03	Кош-Агачский район, около 300м выше по течению от моста через р. Чуя (дорога на Ак-Тру). F –вариация, D- вариация.
13 августа 10:13 14 августа 05:02	Усть-Канский район, на берегу р. Урсул, находящейся между Усть-Каном и с Туекта Онгудайского района. F –вариация, D- вариация.
15 августа 07:48 15 августа 15:36	Онгудайский район, Семинский перевал. Около 1 км от вершины перевала. F –вариация, D- вариация.

Координаты первой точки приведены в локальной системе координат, заложенной на объекте – она описана в (Комплексное изучение..., 2013).

Полученные данные обрабатывались при помощи программы, написанной для пакета MATLAB, при этом строились графики вариаций полного вектора и его погрешности (рис.28), погрешность q_{mc} сопоставлялась с разностью соседних измерений (рис.29), проводился спектральный анализ методом Уэлча (рис.33). На рис.28-30 приведен пример построения таких графиков для измерений на р.Тюте, захватывающих вечерний, ночной и частично утренний сектор. В вечернем секторе наблюдается постепенный рост модуля поля, видимо, связанный с ростом горизонтальной компоненты в данном секторе суточной вариации. В ночном секторе заметны небольшие изменения модуля поля размахом до 4 нТл. Погрешность единичного замера постепенно нарастает в процессе измерений с 7 до 9 пТл, что, видимо, связано с разрядкой аккумулятора. На диаграмме соотношения погрешности единичного замера и разности соседних замеров видно, что выбросов поля не

наблюдается, тем не менее, присутствует чуть более десятка замеров с повышенной погрешностью. Спектральный анализ методом Уэлча выделил спектральные пики на частотах 5.4 мГц (период 185 с), 8.6 мГц (116 с), 10.6 мГц (96 с), 11.6 мГц (86 с), однако поиск участков записи, на которых они наиболее сильно проявляются при помощи данного метода довольно проблематичен, т.к. эти пики наблюдаются на фоне степенной функции. Поэтому для участков записи, на которых выделялись микропульсации, проводился вейвлет-анализ при помощи функций Добеши 5-го порядка согласно методике, разработанной в (Алмадакова и др., 2008). Пример такой обработки представлен на рис. 19. На вейвлет-диаграмме хорошо видно наличие пульсаций классов Pc4 и Pc5, причём сначала с 21:10 до 21:40 выделяются только Pc4, далее (до 22:20) наблюдается постепенное увеличение частот с переходом пульсаций из класса в класс, а на заключительном этапе пульсации существуют независимо, при этом динамика частот в них различна: в диапазоне Pc4 наблюдается повышение частоты внутри цуга, а для Pc5 уменьшение частоты сменяется её падением. Отметим, что последний участок сопровождается ростом D-компоненты и, видимо, соответствует восточному сектору Sq-вихря суточной вариации. На рис. 20 показана частотная зависимость максимума и медианы коэффициентов разложения сигнала по вейвлет-функциям для всего исследуемого диапазона и его участков. В целом картина указывает на наличие двух спектральных пиков, однако для разных диапазонов времени она оказывается несколько различной: если на начальном и конечном участках выделяются два максимума, (в утреннем секторе частоты Pc4 несколько выше), то в промежутке переход между ними сильно сглажен. Свидетельствует ли данная картина перекачке энергии из внешних частей магнитосферы во внутреннюю с меньшими периодами или мы имеем дело с некоторыми артефактами, связанными с особенностями базисных функций, пока неясно, этот вопрос требует дополнительных исследований.

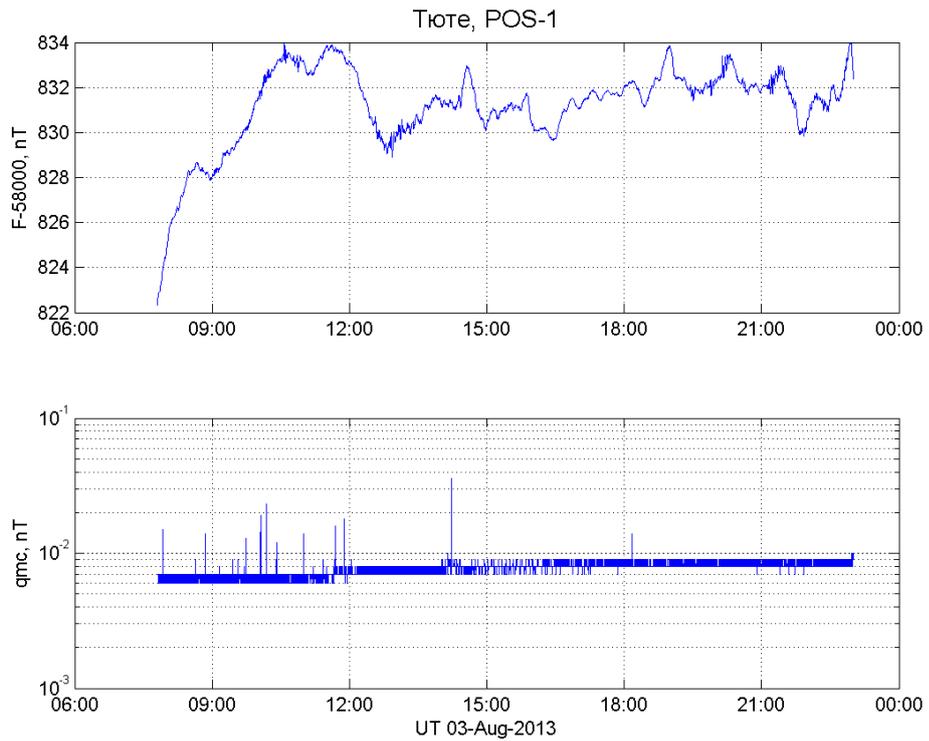


Рис. 28. Результат измерений вариации полного вектора на р.Тюте. Верхняя панель – вариация, нижняя панель – изменение оценки среднеквадратичного отклонения единичного замера qmc .

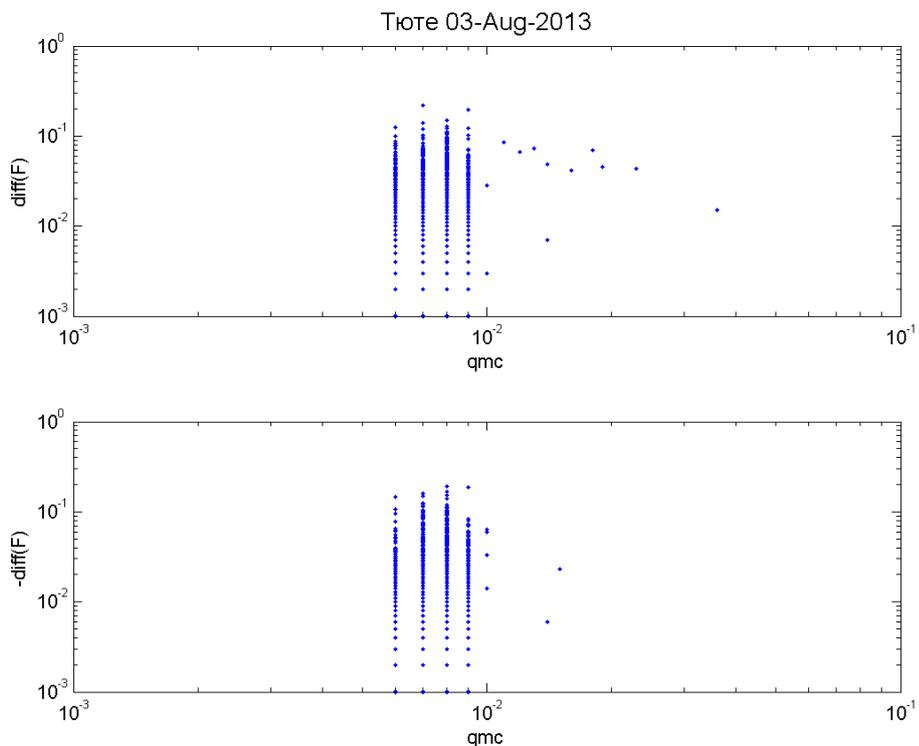


Рис.29. Диаграмма соотношения погрешности единичного замера и разности соседних измерений. Видно, что выбросов поля не наблюдается, тем не менее, присутствует чуть более десятка замеров с повышенной погрешностью.

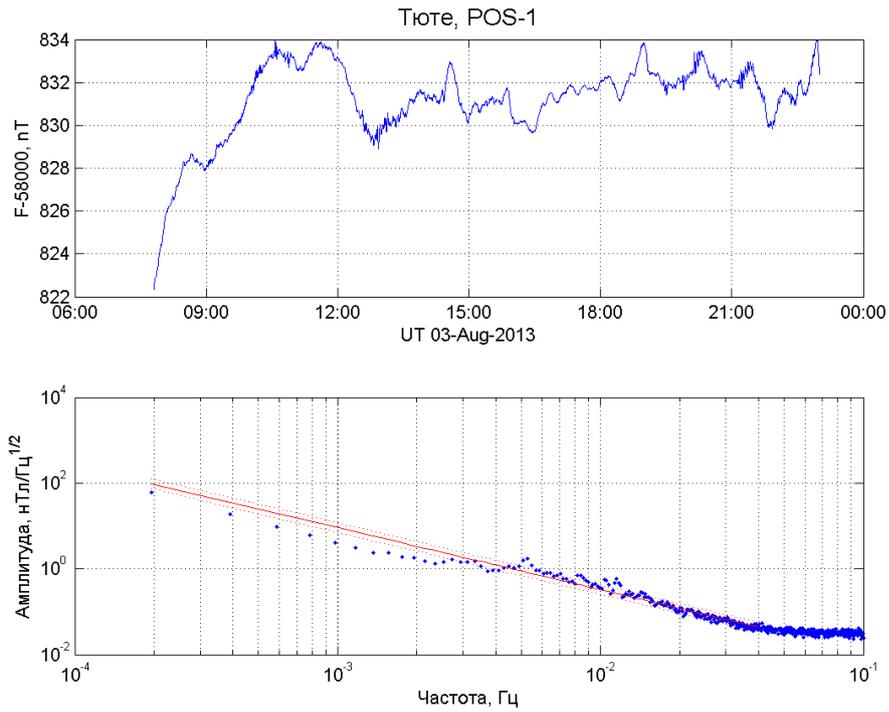


Рис.30. Вариация полного вектора поля и её спектр, рассчитанный методом Уэлча. Ширина окна 2^{10} , число компонент 2^{10} . Прямой показана линейная аппроксимация спектра в двойном логарифмическом масштабе в полосе частот 0.2-30 мГц. Видны спектральные пики на частотах 5.4 мГц (период 185 с), 8.6 мГц (116 с), 10.6 мГц (96 с), 11.6 мГц (86 с).

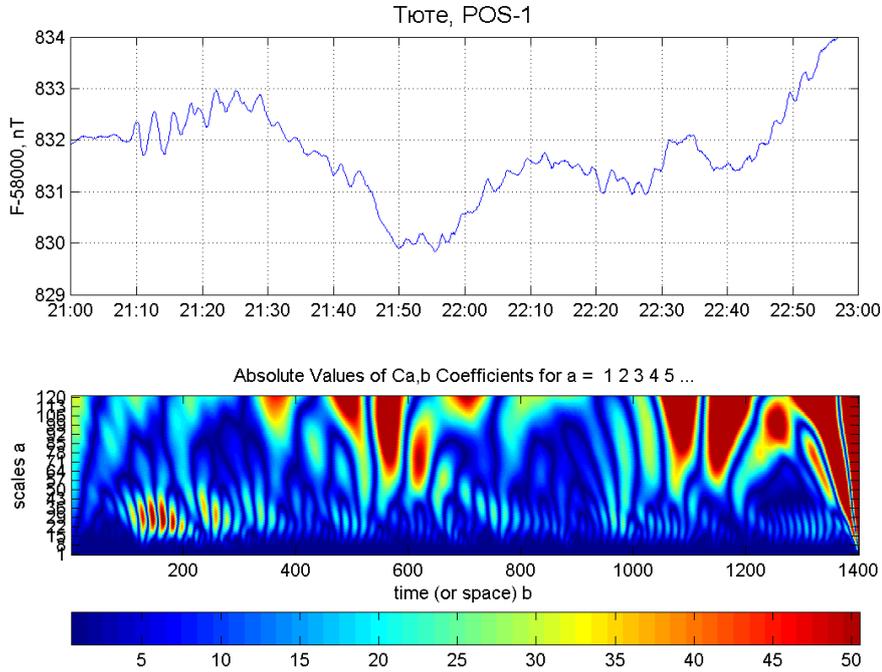
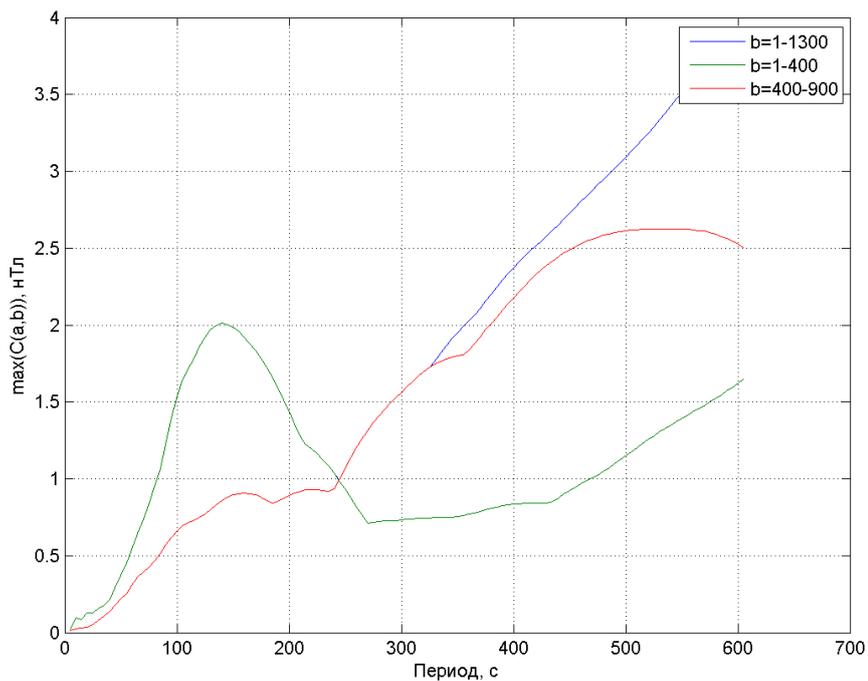
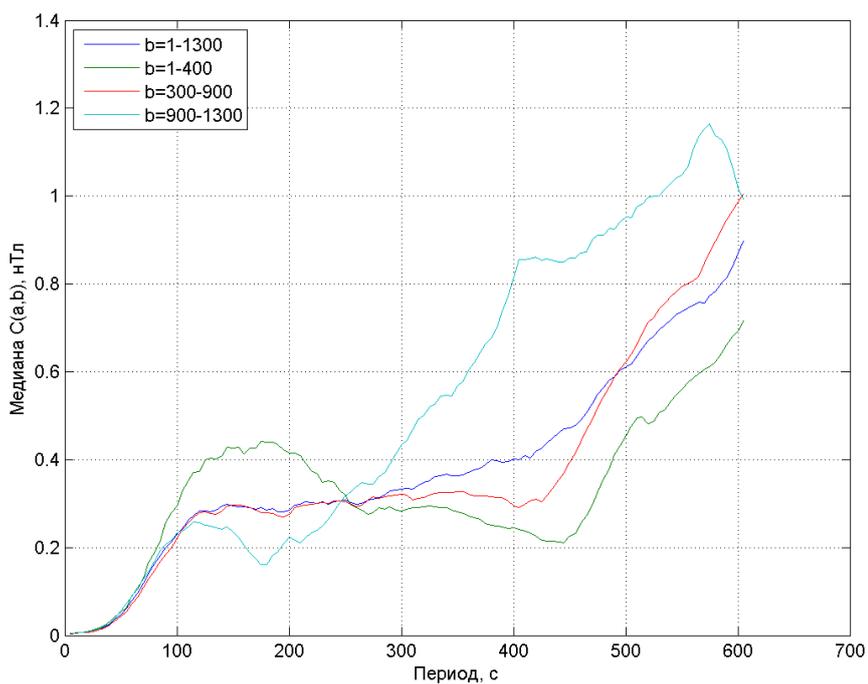


Рис.31. Участок записи в утреннем секторе (04-06 LT), во время которой наблюдались микропульсации (верхняя панель) и результаты вейвлет-анализа этого участка при помощи функций Добеши 5-го порядка.



а



б

Рис. 32. Зависимость максимальных (а) и медиан (б) значений коэффициентов разложения участка записи на р. Тюте (21-23 UT) по функциям Добеши 5-го порядка от периода (масштаба) для разных её участков. В легенде приведены диапазоны значений сдвига, для которых посчитаны коэффициенты. Заметно наличие пульсаций классов Pc4 (период 140с) и Pc5.

10. Разработка программ для расчёта и анализа спектральных характеристик вариаций компонент магнитного поля и их фрактальных размерностей.

10.1. О фрактальной размерности магнитных вариаций

В последние годы в связи с поиском предвестников землетрясений появился ряд работ по изучению фрактальной размерности магнитных вариаций. При этом процесс подготовки сильного землетрясения рассматривается как процесс с самоорганизованной критичностью, при котором среда проходит через несколько стадий: начальная стадия (случайный хаос) – субкритическая – критическая – суперкритическая стадия. Параметры такой среды обнаруживают фрактальные свойства во временной и пространственной шкале, а спектр геомагнитных вариаций обладает степенной зависимостью плотностью мощности S от частоты f : $S(f) \cong f^{-\beta}$, где β – фрактальный индекс. Впервые значительное снижение фрактального индекса перед землетрясением и снижение интенсивности солнечносуточных вариаций в течение 2-х месяцев после события в Гуаме (1993 г., Ms=8.0) были описаны в работах (Hayakawa et al, 1999; Kopytenko et al, 2001). Сейсмогенные КНЧ-вариации обнаруживались за 4 месяца до события и в течение 2-х месяцев после него. Фрактальный индекс вариаций в полуденном секторе менялась в диапазоне от 2.5 до 0.7 с тенденцией значительного снижения в процессе подготовки землетрясения. Сходный эффект был обнаружен для ночного сектора.

Различные методы расчёта фрактальной размерности: аппроксимация спектра быстрого преобразования Фурье линейной функцией в логарифмическом масштабе (FFT-метод), метод Хигучи, метод Бурлаги-Клейна описаны в работе (Gotoh et al, 2004). В первом случае фрактальная размерность сигнала после аппроксимации спектра методом наименьших квадратов определяется по уравнению Берри: $D = (5 - \beta) / 2$. Авторы отмечали трудности, возникающие при применении FFT-метода, связанные с

появлением нелинейности спектра в сейсмоактивный период и их отсутствие у метода Хигучи. На тестовой выборке, построенной методом броуновского движения с белым шумом, было показано, что точность оценок, получаемая FFT-методом, значительно снижается при фрактальной размерности более 1.75 (anti-persistent noise) и менее 1.4 (persistent noise), метод Бурлаги-Клейна даёт слегка заниженные оценки, а метод Хигучи достигает наилучших результатов. Кроме того, авторами показана большая робастность оценок фрактальной размерности, получаемая методом Хигучи и, в несколько меньшей степени, Бурлаги-Клейна: при отношении сигнала к шуму 30 дБ ошибка в определении фрактальной размерности тестовой выборки методом Хигучи менее 0.05, Бурлаги-Клейна – около 0.07, FFT-методом – 0.12, при 10 дБ – 0.35, 0.42 и 0.7 соответственно, все три метода довольно хорошо работают при отношении амплитуды сигнала к шуму порядка 100 (40 дБ).

Был проведен анализ КНЧ-эмиссий, связанных с флалпом землетрясений в районе острова Изу в июле-августе 2000 г. (4 события с $M > 6.0$). Анализ фрактальной размерности горизонтальной компоненты в часовом интервале вблизи полуночи обнаружил её рост примерно за месяц до первого землетрясения, снижение после толчка и повторный рост перед вторым событием. Третье событие не выявило особенностей фрактальной динамики, а последнему толчку опять предшествовал рост фрактальной размерности. Отмечается отсутствие связи фрактальной размерности с сейсмикой на станции Какиока, удалённой от эпицентра на 160 км, в то время как на расстояниях 80 и 130 км она фиксируется.

Аналогичный эффект роста фрактальной размерности вариаций горизонтальной компоненты для дневного часового интервала (14:00 – 15:00 LT), рассчитанной всеми тремя методами, показан для землетрясения в Гуаме. Кроме того, замечена периодичность изменений фрактального индекса в 1994 г., которую объясняют антикорреляцией фрактальной размерности с геомагнитной активностью.

Довольно значительный блок работ, связанных с использованием данной методики, выполнен в Мексике Косаренко с соавторами. В работе (Kotsarenko et al, 2004) ими впервые обнаружено снижение фрактального индекса за несколько суток перед землетрясением по наблюдениям на станции Теолоюкан (Центральная Мексика) во время 7 сильных землетрясений в Мексике за 1998-2001 гг. При этом анализировался спектр сигнала в двух ночных интервалах 00-03 и 03-06 LT, а для исключения дней с высокой геомагнитной активностью использовался Ap-индекс за соответствующие временные интервалы. Для учёта энергии сейсмических событий и расстояния до них использовался сейсмический индекс $k_s=10^{0.75M_s}/10D$, где M_s – магнитуда события, D – расстояние до эпицентра в км.

В работе (Kotsarenko et al, 2005) было также обнаружено, что перед землетрясениями на близких к экватору станциях Теолоюкан и Пекин наблюдаются локальные узкополосные геомагнитные вариации (резонансные спектральные структуры, РСС) горизонтальной компоненты на частотах 10.2-11.1 и 13.6-14.5 мГц. Авторы связывают их генерацию с процессами в экваториальной токовой струе (на станциях уже в 150 км от Пекина эти вариации не наблюдались). Предварительные качественные оценки обнаружили значимую корреляцию РСС с суточной Sq-вариацией и зависимость этой связи от солнечной активности (Dst-индекс). Авторы проводили расчет спектра в скользящем окне объёмом выборки 2^{13} (что соответствует длительности 2 ч 16 мин 32 с), позволяющем достичь оптимального разрешения в диапазоне 0-30 мГц, наиболее перспективного для наблюдений сейсмогенных КНЧ-эмиссий. Возможно, нами были обнаружены подобные локальные резонансные структуры на частотах 5, 6, 7.3 мГц во время магнитной бури 26.07.2004, сопровождавшейся слабым толчком в эпицентральной зоне Алтайского землетрясения (Гвоздарев и др., 2005): в Бельтире они фиксировались, в то время как в спектре магнитной вариации, снятой в Акташе, уже не наблюдались. Правда, в данном случае вряд ли можно говорить о влиянии на генерацию этих вариаций

экваториальной токовой струи. Между тем, наблюдаемые частоты соответствуют диапазону Pс4 и могут быть следствием возбуждения резонанса для магнитозвуковой волны, распространяющейся вдоль силовой линии магнитного поля.

В (Kotsarenko et al, 2007) показана локальность снижения фрактального индекса перед землетрясением – на других станциях подобной его динамики не наблюдалось. Заметим, что несмотря на знакомство авторов с работой (Gotoh et al, 2004), ими используется FFT-метод (и вполне успешно) с расчётом фрактального индекса по часовому интервалу в 3600 значений. Согласно (Науакawa, 1999) фрактальный индекс имеет 27-дневную периодичность, связанную с периодом вращения Солнца.

Для анализа спектров было решено использовать FFT-метод как наиболее простой и метод Хигучи как наиболее робастный. Предполагалось приобрести опыт подобных расчётов, установить пределы изменчивости фрактального индекса, сделать попытку обнаружить какие-либо связи данного параметра с сейсмическими событиями, геомагнитной активностью.

10.2. Разработка программ расчета фрактальной размерности сигнала

Для написания программ использовался пакет математических программ MATLAB. Проводился расчёт спектра сигнала за вычетом среднесуточного значения при помощи быстрого преобразования Фурье, затем проводилась его аппроксимация в логарифмических координатах полиномом первого порядка методом наименьших квадратов, в результате рассчитывался фрактальный индекс и его погрешность. Результаты записывались в файл.

Расчёт фрактальной размерности проводился по следующему алгоритму: для ряда данных $X(i) \ i = 1 \dots N$ рассчитывается расстояние между элементами при $m = 1 \dots k$

$$L_m(k) = \frac{1}{k} \left\{ \left(\sum_{i=1}^{\lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor} |X(m+ik) - X(m+(i-1)k)| \right) \frac{N-1}{k \lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor} \right\}$$

которое затем усредняется по всем m

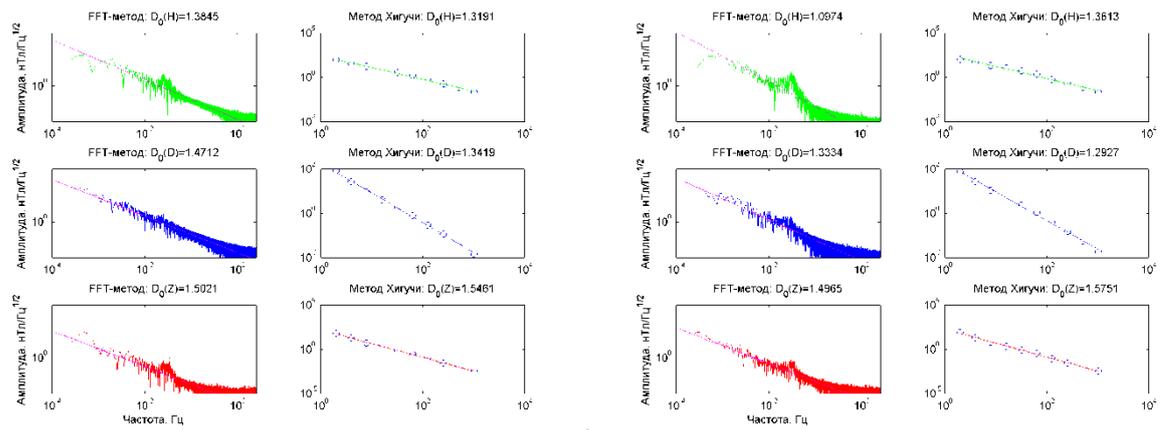
$$L(k) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k L_m(k)$$

Полученное усредненное расстояние зависит от масштаба степенным образом, причём показатель степени есть фрактальная размерность.

$$L(k) \sim k^{-D}$$

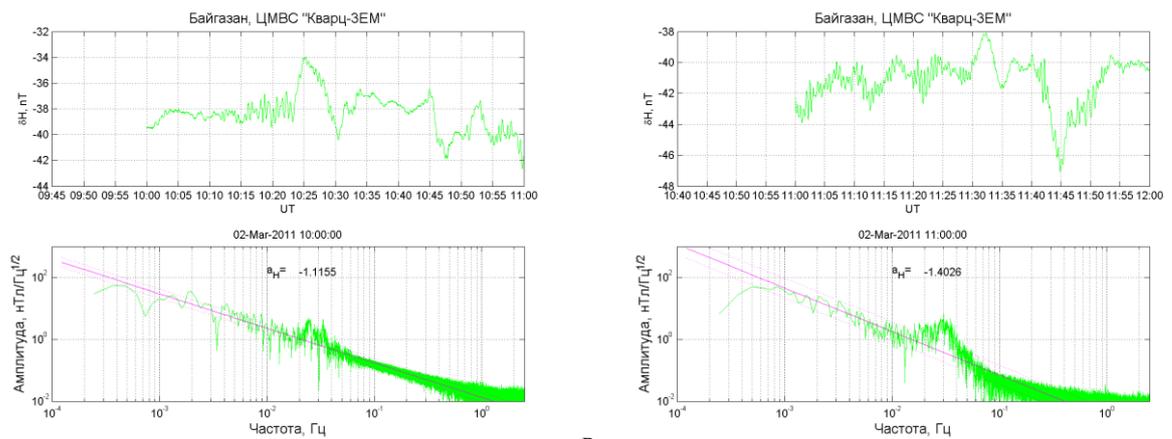
В программе в качестве масштаба k брались степени двойки до десятой включительно. Результаты сравнения расчётов фрактальной размерности по часовым отрезкам записи двумя методами показаны на рис.33. На рисунке видно, что в результате появления довольно сильных микропульсаций Рс3 в горизонтальной компоненте фрактальная размерность, рассчитанная FFT-методом, значительно изменилась (с 1.38 до 1.10), в то время, как размерность, рассчитанная методом Хигучи, осталась почти неизменной (с 1.35 до 1.36). Это происходит вследствие того, что FFT-спектр теряет степенную зависимость из-за появления спектрального пика микропульсации.

В дальнейшем планируется провести анализ динамики спектра в зависимости от сейсмических событий на территории Алтае-Саянского региона.



а

б



в

г

Рис. 33. Пример неустойчивости FFT-метода к появлению микропульсаций: а, б – спектры вариаций для трёх компонент геомагнитного поля (фрактальная размерность D_0 записана в заголовке каждой панели); в, г – вариации горизонтальной компоненты и их спектры. Слева графики за часовой интервал 10-11 UT, справа – 11-12 UT 2 марта 2011 г.

Выводы

1. Разработан новый регистратор для кварцевого вариометра, отличающийся большей морозоустойчивостью и пониженным уровнем шумов (3-10 нТл для СКО по 5 измерениям в секундной выборке). Прибор установлен на кордоне Байгазан, в результате удалось существенно снизить уровень потерь зимой 2012-13 гг. (до 0.8%).
2. Проведен сравнительный анализ применимости двух методов спектрального анализа (Томсона и Уэлча) из пакета приложений Signal Processing математического пакета MATLAB к анализу геомагнитных пульсаций. Показано, что метод Уэлча более удобен в применении, т.к. требует меньшего машинного времени для расчётов. Найдены оптимальные параметры (длина окна сглаживания), позволяющие выявлять пульсации разных типов.
3. Проведён анализ встречаемости пульсаций во время двух магнитных бурь. Во время магнитной бури 13 ноября 2012 г. одновременно наблюдались пульсации классов Pc3 и Pc4, в то время как в невозмущённой обстановке обычно встречаются более широкополосные пульсации класса Pc3-4. На четвертый день после прохождения главной фазы бури, 18 ноября, в преддуренные часы были выявлены пульсации класса Pc1. В мартовских данных эти пульсации наблюдались на третий день в ночные часы. Описанные явления соответствуют литературным данным.
4. Освоена технология оценки температурных коэффициентов базисных значений кварцевого вариометра по результатам ночной регистрации в магнитоспокойные дни. Рассчитаны соответствующие коэффициенты и значения базисных по минутным средним 2011 г. Обнаружено, что температурные коэффициенты имеют величину до 2 нТл/°С и в летние месяцы для горизонтальной и вертикальной компоненты могут даже сменить знак. Для склонения коэффициент температурной нестабильности не превышает 0.5 нТл/°С.

5. Проведено сравнение минутных средних значений компонент станции за 2011 г. с результатами измерений на 4 близлежащих магнитных обсерваториях (NVS, IRT, AAA, WMQ). В целом вариации горизонтальной компоненты и склонения на станциях довольно схожи, наибольшие различия наблюдаются в динамике вертикальной компоненты.
6. По минутным средним 2011 г. рассчитана суточная вариация компонент геомагнитного поля на станции Байгазан и определены значения K-индекса за 2011 г.
7. Разработан индукционный магнитометр на базе датчика ИНТ-1.
8. Проведены абсолютные измерения на станции. Определены базисные значения кварцевого вариометра Средние значения за 19-20 октября составляют: **$D_0=4^0 51' 22''$** , **$H_0=18637.23$ нТ**, **$Z_0=55743.0$ нТ**
9. Проведены измерения вариации полного вектора и горизонтальной компоненты (или склонения) в 7 пунктах мониторинга на территории Горного Алтая во время полевых работ.
10. Освоен алгоритм расчёта фрактальной размерности магнитной вариации методом Хигучи.

Литература

1. *Алмадакова, Г.В.* Исследование спектра магнитных вариаций с помощью вейвлет-преобразований / *Алмадакова, Г.В., Рейсик, Е.В., Гвоздарев А.Ю.*// Вестник молодых ученых: Сборник научных работ – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2008. – №5 – С. 5-9.
2. *Бакчабаев, А.М., Бетёв, А.А.* Расчёт минутных средних значений компонент геомагнитного поля на станции «Байгазан» за 2010-2011 гг. // Вестник молодых учёных: Сборник научных трудов. - №9. – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2012. – С.152-155.
3. *Бакчабаев А.М., Гвоздарев А.Ю., Учайкин Е.О. Хомутов С.Ю.* Организация контроля базисных значений вариометров на магнитной станции «Байгазан» // Научный вестник Горно-Алтайского государственного университета - №8 - Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2013. – С. 156-175.
4. *Беляшов А.В., Гвоздарев А.Ю., Хомутов С.Ю.* Новая магнитная станция в г. Курчатове, Казахстан [текст] // Вестник НЯЦ РК – Вып.2 (50). – июнь 2012. – С.41 – 47.
5. *Гвоздарев, А.Ю., А.И. Бакиянов, А.А. Бетёв, Е.О. Учайкин, П.Б. Бородин, С.Ю. Хомутов* Организация непрерывной регистрации магнитных вариаций на станции Байгазан (Телецкое озеро) [Текст // Научный вестник Республики Алтай – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2010. - №4. – С.31-42; Физика окружающей среды: Материалы VIII Международной школы молодых ученых. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. – С. 46-59.
6. *Гвоздарев А.Ю., Бетёв А.А., Бакиянов А.И., Учайкин Е.О.* Регистрация геомагнитных вариаций на станции Байгазан (Телецкое озеро, Горный Алтай): результаты 2010 г.// Физика окружающей среды: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвящённой 50-летию первого полёта человека в космос и 75-летию регулярных исследований ионосферы в России – Томск: Томское университетское изд-во, 2011. – С. 240-243.

7. *Гвоздарев, А.Ю., Кудин, Д.В., Учайкин, Е.О.* Об одном подходе к разработке протонного магнитометра [текст] // Ползуновский вестник - №3/2 – 2012а. – С.184 – 186.
8. *Заболотная Н.А.* Индексы геомагнитной активности: Справочное пособие. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 88 с.
9. Измерения вариаций геомагнитного поля на магнитной станции Байгазан: база данных / Гвоздарев А.Ю., Кудин Д.В., Учайкин Е.О., Хомутов С.Ю., Кудрявцев Н.Г., Бетёв А.А., Бакиянов А.И., Бакчабаев А.М. – свидетельство о гос. регистрации №2012621011 от 28.09.2012.
10. Исследование геомагнитных вариаций на территории Горного Алтая: отчёт о НИР / Горно-Алтайский гос. ун-т; Руководитель: Гвоздарев А.Ю. – Горно-Алтайск, 2012. – 25 л. – Исполн.: Гвоздарев А.Ю., Бакчабаев А.М., Кудин Д.В., Учайкин Е.О.
11. *Кудин Д.В., Учайкин Е.О.* Разработка регистратора данных для цифровой магнитовариационной станции «Кварц-ЗЕМ» // Физика окружающей среды: Материалы VIII Международной школы молодых ученых. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. – С. 99-101.
12. *Кудрявцев Н.Г., Кудин Д.В., Учайкин Е.О.* Разработка и реализация CAN-сети для геофизического измерительного комплекса // Ползуновский вестник
13. Комплексное научное изучение территории Башадарских курганов 2004-2011 гг.: Препринт ГАГУ – 2013/1. – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2013. – 120 с.
14. Метод наименьших квадратов для зависимости $y=ax+b$ [эл. ресурс] <http://www.sinisha.ru/math/mnk.html> / Дата посещения: 15.01.2014.
15. *Нечаев С.А.* Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. – Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2006. – 140 с.
16. *Паркинсон У.* Введение в геомагнетизм. – М.: Мир, 1986. – 528 с.

- 17.Программа для регистратора данных вариационного магнитометра:
ПРОГРАММА ДЛЯ ЭВМ/ Кудин Д.В., Кудрявцев Н.Г., Учайкин Е.О.,
Гвоздарев А.Ю., Сахневич М.Б. - Свидетельство №2013613406
- 18.*Djadkov P.G., Mikheev O.A., Minenko M.I., Sobolev O.A.* Some results of tectonomagnetic monitoring in the epicentral zone of the M7.5 Altay earthquake, September 27, 2003 // *Annals of geophysics*, 2007, Vol. 50, № 1, P. 31-37.
- 19.*Gotoh, K., Hayakawa, M., Smirnova, N.* Fractal analysis of the ULF geomagnetic data obtained at Izu Peninsula, Japan in relation to the nearby earthquake swarm of June-August 2000 // *Natural Hazards and Earth System Science*. - 2003. – Vol. 3, No 3-4. - P. 229-236.
- 20.*Gotoh, K., Hayakawa, M., Smirnova, N., Hattori, K.* Fractal analysis of seismogenic ULF emissions // *Phys. Chem. Earth*. - Vol. 29. – 2004. - P. 419–424.
- 21.*Hayakawa, M., Ito, T., Smirnova, N.* Fractal analysis of ULF geomagnetic data associated with the Guam earthquake on August 8, 1993 // *Geophysical Research Letters*. - 1999. – Vol. 26, No. 18. - P. 2797-2800.
- 22.INTERMAGNET Technical Reference Manual, ver.4.4, 2008, 85 P. (ref. <http://www.intermagnet.org>)
- 23.*Kopytenko, Yu., Ismaguilov, V., Hayakawa, M., Smirnova, N., Troyan, V., Peterson, Th.* Investigation of the ULF electromagnetic phenomena related to earthquakes: contemporary achievements and the perspectives // *Ann. Geofis.* – Vol. 44. – 2001. - P. 325–334.
- 24.*Kotsarenko, A., Perez Enriquez, R., Lopez Cruz-Abeyro, J.A., Koshevaya, S., Grimalsky, V.* Analysis of the ULF electromagnetic emission related to seismic activity, Teoloyucan geomagnetic station, 1998–2001 // *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*. – 2004. – Vol. 4, No. 5–6. – P. 679–684.

25. *Kotsarenko, A., Molchanov, O., Perez Enriquez, R., Lopez Cruz-Abeyro, J.A., Koshevaya, S., Grimalsky, V., Kremenetsky, I.* Possible seismogenic origin of changes in the ULF EM resonant structure observed at Teoloyucan geomagnetic station, Mexico, 1999–2001 // *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*. – 2005. - Vol. 5, No. 5. – P. 711–715.
26. *Kotsarenko, A., Perez Enriquez, R., Lopez Cruz-Abeyro, J.A., Koshevaya, S., Grimalsky, V., Yutis, V., Kremenetsky, I.* ULF geomagnetic anomalies of possible seismogenic origin observed at Teoloyucan station, Mexico, in 1999–2001: intermediate and short-time analysis // *Tectonophysics*. – 2007. – Vol. 431, No. 1–4. – P. 249–262.