

## ОБ ИСТОЧНИКЕ ДЕМОДУЛЯЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ СТЕНДА EISCAT ПРИ ЕГО РАБОТЕ ПО ВЕЧЕРНЕМУ ТЕРМИНАТОРУ

*И.Х. Ковалева, Ю.А. Корсунская, Ю.В. Поклад, И.А. Ряховский,  
Ю.С. Рыбнов, В.А. Харламов*

Проведён детальный анализ происхождения различных компонент магнитометрического сигнала, регистрируемого во время модулированного нагрева ионосферы стендом EISCAT. Спектральные характеристики амплитуд принимаемого в ГФО ИДГ РАН «Михнево» низкочастотного сигнала сопоставлены с этими данными. Сделан вывод о том, что модуляционный процесс связан не с током электроджета, а с ионосферными АГВ-магнитогидродинамическими возмущениями.

### Введение

За последние годы проведено большое количество экспериментов по модулированному нагреву ионосферы в диапазоне частот модуляции  $1 \sim 2000$  Гц, однако результаты в виде достаточно интенсивного ELF сигнала на больших расстояниях от места возбуждения получают эпизодически. Результаты успешного эксперимента по регистрации таких сигналов (частоты 28, 32, 38, 44 Гц) от стенда HAARP, регистрировавшихся на Гуаме и Гавайях, были представлены [Chang, Papadopoulos, 2010]. Papadopoulos-ом была представлена теоретическая интерпретация этого явления, в основе которой лежит гипотеза о двух возможных механизмах передачи низкочастотного сигнала. Первый механизм хорошо известен и основан на модуляции тока электроджета. Второй – предполагает при модулированном нагреве F-области ионосферы возникновение зоны повышенной плотности, волнового возмущения, возбуждающего систему диамагнитных токов. В своё время в работе [Jin, Spasojevic, Inan, 2009] рассматривалась зависимость амплитуды регистрируемого ELF сигнала на частоте 2125 Гц при модулированном нагреве электроджета. По классической гипотезе первого механизма амплитуда ELF сигнала должна быть прямо пропорциональна  $\Delta H$ . Однако экспериментальные результаты демонстрируют как случаи прямой пропорциональности, так и случаи чёткой обратной пропорциональности амплитуды ELF сигнала от магнитной вариации. В той же работе [Jin, Spasojevic, Inan, 2009] делается вывод о возможности нарушения пропорциональности ELF сигнала интенсивности тока электроджета при вариациях магнитного поля менее 50 нТл, высказывается предположение, что это связано с неправильным определением стационарного магнитного поля, от величины которого отсчитывается магнитная вариация.

Авторам представляется такой метод анализа достаточно ограниченным, основанным только на первом из предложенных механизмов. В настоящее время считается общепринятым, что магнитометрический сигнал, регистрируемый на Земле, является суммой сигнала, производимого током электроджета, и сигнала, формируемого системой диамагнитных токов, образующихся в процессе крупномасштабной конвекции нагретых нейтральных и заряженных компонент плазмы полярной ионосферы. Выделение второго вида сигналов в магнитных бурях, определение его параметров является предметом исследований последних лет [Zaka, Koba, Assamoi et al., 2009]. Более детальный анализ магнитометрических сигналов, регистрируемых при работе стенда EISCAT в режиме модулированного нагрева, сопоставление уровней принимаемых низкочастотных сигналов с амплитудами магнитометрических возмущений различной природы позволил бы получить свидетельства работы первого или второго механизмов демодуляции.

### Анализ геофизической ситуации над Tromsø 20.02.2012

В качестве примера проведем подробный анализ одного дня 20.02.2012 модулированного нагрева на стенде в Tromsø, когда в Геофизической обсерватории (ГФО) ИДГ РАН «Михнево» был принят низкочастотный сигнал со значительным превышением уровня шумов. Модулированный нагрев на стенде EISCAT осуществлялся в период от 16 до 19 UT часов. Рассмотрим более подробно геофизические условия этого дня, как они отразились на различных геофизических данных, измеренных различными приборами. Прежде всего, необходимо отметить наличие в этот день рентгеновской вспышки, «хвост» которой попадает на терминатор над нагревным стендом. Временная зависимость мощности рентгеновского излучения в различных диапазонах длин волн в рассматриваемый период представлена на рис. 1.

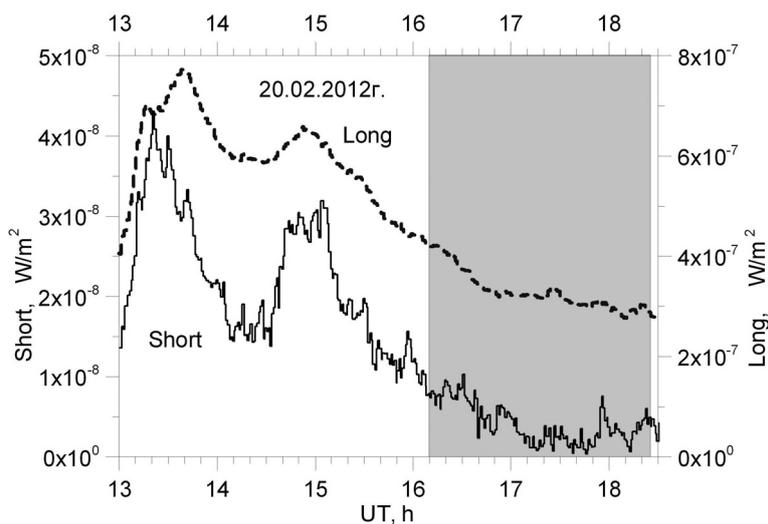
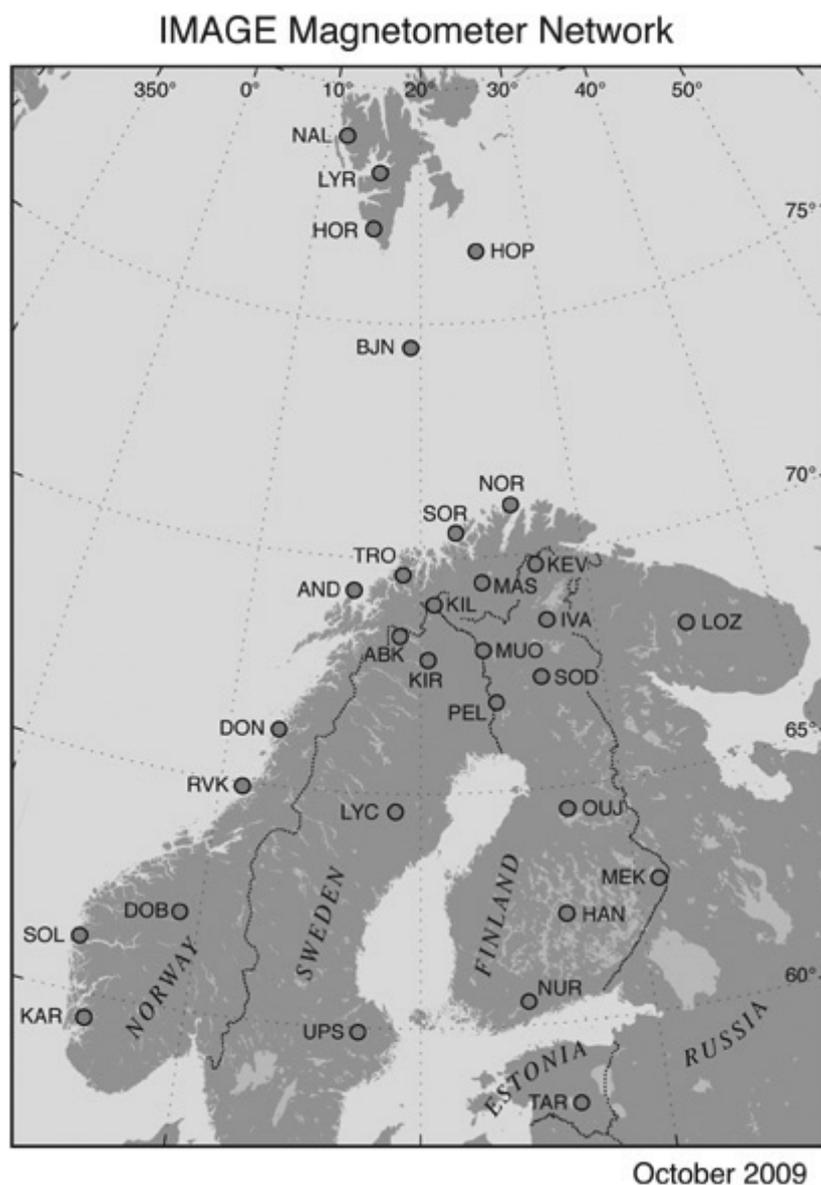


Рис. 1. Потоки рентгеновского излучения Солнца на уровне орбиты Земли, полученные на основе спутниковых измерений

Время работы стенда приходится на время прохождения терминатора. Модулированный нагрев осуществлялся с 16 до 19 часов. В фазе релаксации возмущения ионосферы, вызванного солнечной вспышкой, усилился спорадический слой-E (так что критическая частота его колебалась от 2 до 4 МГц в двух градусах южнее Tromso над Sodankyla). Высота, по которой работал стенд, не определена и, видимо, постоянно менялась в процессе работы. Можно ожидать, что все эффекты, обычно возникающие на терминаторе, были более выражены и акустико-гравитационные терминаторные волны постоянно меняли высотный профиль плотности плазмы.



**Рис. 2.** Положение цепи магнитометрических станций

Рассмотрим записи магнитных возмущений на цепи магнитометров от полярных широт вблизи Tromsø (Soroa 70,54°), до средних широт (Тарту 58,26°). Положение станций приведено на карте рис. 2. Значения вариаций Y компоненты магнитного поля (в направлении восток-запад) сети геофизических станций IMAGE приведены на рис. 3.

Основная черта данных записей в период от 17 до 19 часов UT, это проникновение магнитного возмущения (со спадающей по мере уменьшения широты амплитудой) в средние широты. Такие формы записи хорошо известны. Они соответствуют так называемым DP2 возмущениям магнитной бури. [Nishida, 1968a,b; Nishida,

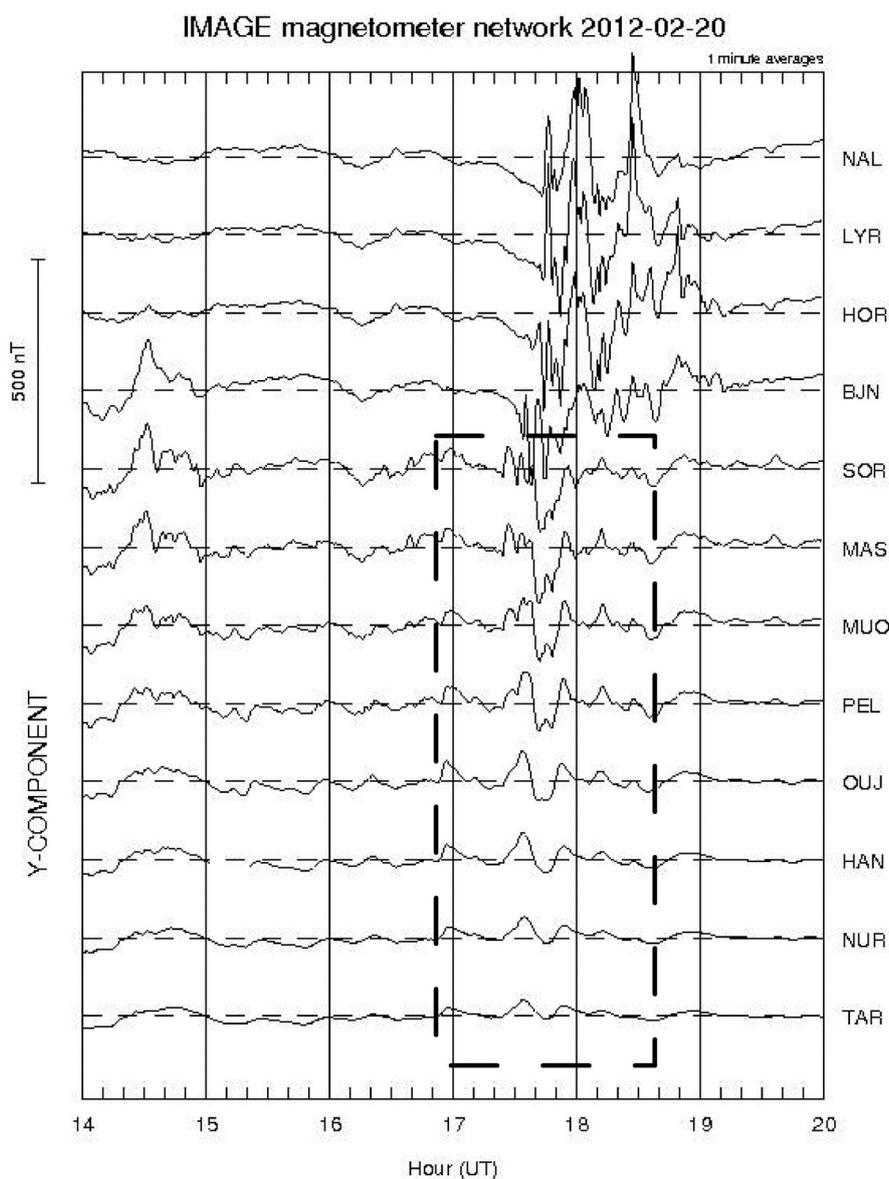


Рис. 3. Вариации магнитного поля (Y-компонента) на сети магнитометрических станций IMAGE

1971; Kikuchi, Luhr, Kitamura et al., 1996; Koba, Richmond, Emery, et al., 2000; Moto-  
 ba, Kikuchi, Luhr et al., 2002; Kikuchi, Ebihara, Hashimoto et al., 2010]. DP2 вариации  
 представляют собой квазипериодические возмущения ионосферно-магнитосферной  
 токовой системы с периодами в диапазоне 25–75 мин (чаще всего 30–40 мин). По  
 современным представлениям механизм их образования следующий: в магнито-  
 сфере в спокойных условиях существует крупномасштабное конвективное электри-  
 ческое поле, направленное от рассвета к закату. В спокойном состоянии магнито-  
 сферы оно не может проникнуть во внутреннюю магнитосферу из-за экраниров-  
 ки альвеновским слоем. Когда межпланетное магнитное поле (IMF) быстро меняет  
 свою полярность, то вариации конвективного электрического поля проникают во  
 внутреннюю магнитосферу и проецируются на средние и низкие широты вдоль си-  
 ловых линий магнитного поля, производя характерные ионосферное поле и токо-  
 вую систему [Kikuchi, Luhr, Kitamura et al., 1996], которая накладывается на днев-  
 ную  $S_q$ . Геометрия этой дополнительной токовой системы определяет наибольший  
 эффект именно на  $Y$  компоненте магнитной вариации. Практически синхронно воз-  
 никающие в большом диапазоне широт квазипериодические возмущения магнит-  
 ного поля один из характерных признаков DP2. Ионосферные магнитометрические

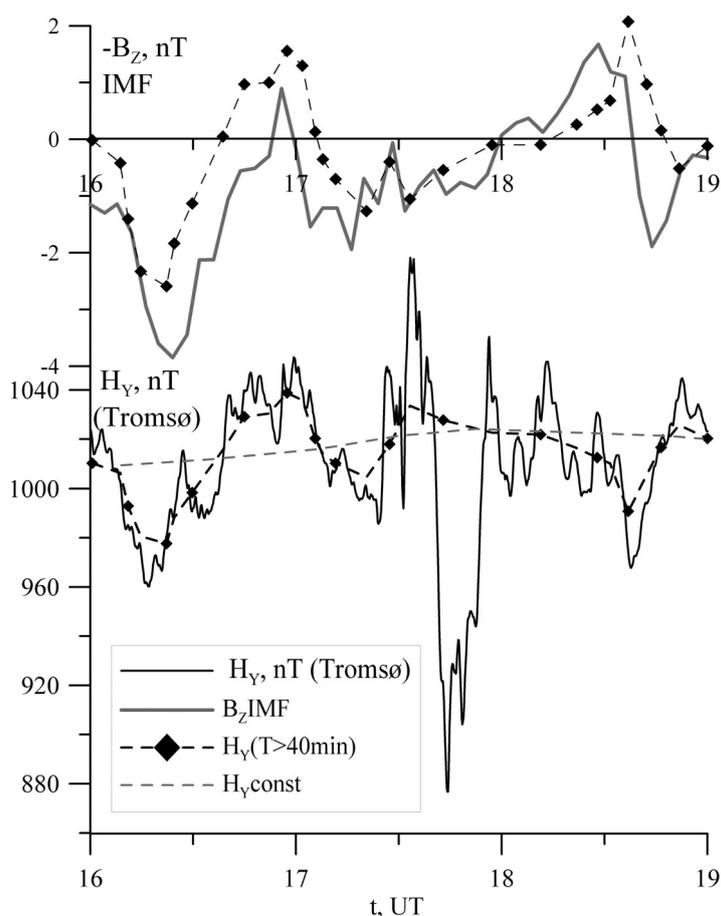
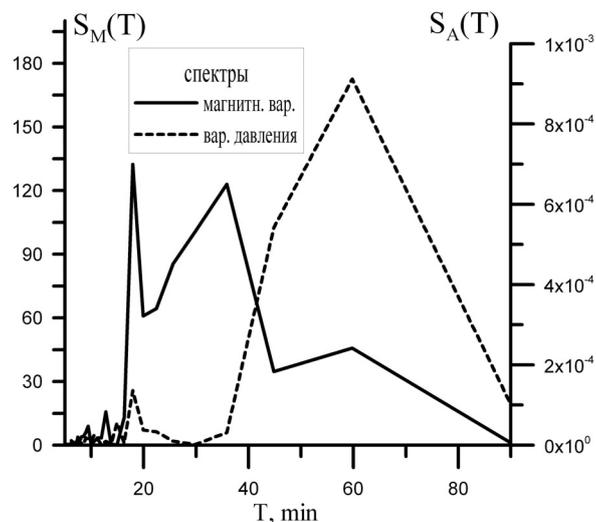


Рис. 4. Сопоставление волновой формы  $B_z$  IMF с записью магнитометра в компоненте  $H_y$

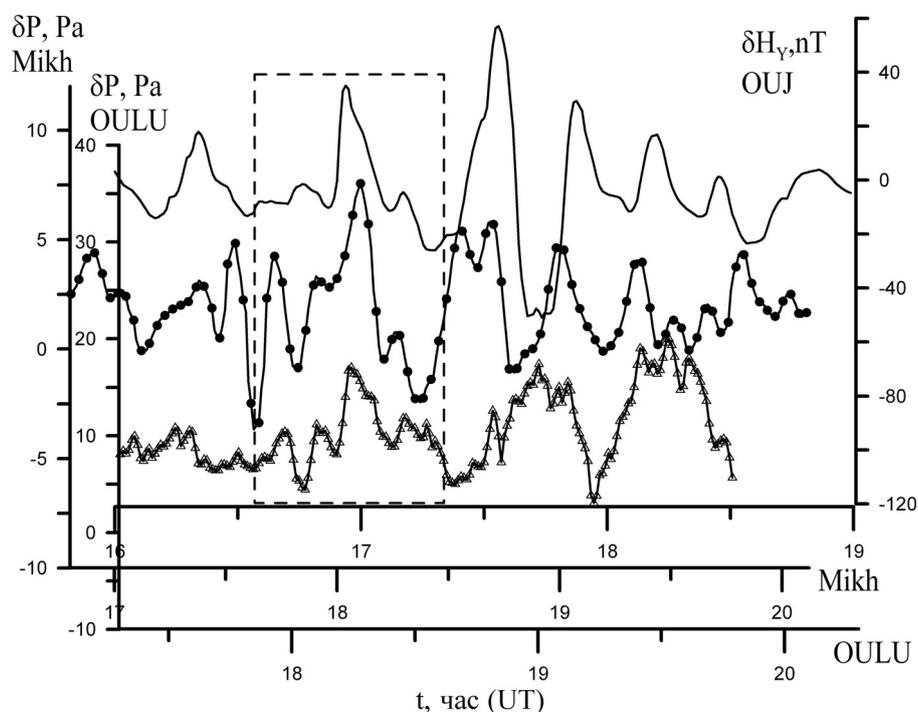
колебания воспроизводят колебания  $B_z$  компоненты IMF с задержкой  $\sim 8-9$  мин (в фазе или противофазе, в зависимости от положения точки наблюдения относительно дополнительной токовой системы). Сопоставим данные по наземным магнитометрическим колебаниям со спутниковыми данными за тот же период времени (данные по IMF приведены с задержкой 8 мин). Волновое возмущение  $H_y$  разбито на сигналы трёх уровней (в зависимости от источника): квазипостоянное магнитное поле (приведённое пунктиром), медленно меняющееся поле, коррелирующее с изменениями IMF (пунктир с ромбами), и высокочастотная компонента. Видно, что колебания, связанные с изменением направления IMF, присутствуют в сигнале, как его составляющая часть. Для удобства сопоставления низкочастотная часть сигнала  $H_y$  приведена прямо на графике IMF (первую половину временного интервала со знаком +, вторую – со знаком –). Спектр колебательных возмущений ионосферного магнитного поля  $H_y$  приведён на рис. 5. Для удобства сопоставления используются данные магнитометрической станции Oulujarvi ( $64,52^\circ\text{N}$ ;  $26,60^\circ\text{E}$ ) совместно с записями флуктуаций давления, которые производятся на нейтронной станции университета OULU ( $65,01^\circ\text{N}$ ;  $25,47^\circ\text{E}$ ). На спектре магнитных флуктуаций присутствует два выраженных максимума. Один, как и ожидалось, соответствует частотному диапазону DP2. Это максимум колебаний с периодом  $\sim 40$  мин. Второй, более высокочастотный максимум, соответствует периоду  $\sim 18$  мин. Необходимо отметить, что часто регистрируются, возбуждаемые DP2, вторичные колебания магнитосферы на гармониках магнитосферных полоидальных и тороидальных

**Рис. 5.** Спектр волновых возмущений наземного магнитного поля (сплошная линия) и акустических колебаний (пунктир)



мод (с периодами в несколько минут) [Motoba et al., 2002]. DP2 способно возбуждать и Pi2 пульсации (с периодами десятков и сотен секунд). Высказываются мнения, что DP2 способно усилить терминаторные волны. Период 18 мин относится к диапазону PC6. Этот период слишком велик, чтобы принадлежать собственным частотам магнитосферы. Природа возникновения этих колебаний вблизи вечернего терминатора в настоящее время находится в стадии исследования. Существует даже термин – закатное PC6 (dusk PC6). При этом все авторы работ по этому явлению согласны с тем, что в данном возмущении присутствует компонента ионосферного колебательного движения.

Для описания этих колебаний привлекается неустойчивость Кельвина-Гельмгольца с различными модификациями. Так же высказывалось предположение, что эти волны можно отнести к АГВ колебаниям F2-слоя ионосферы. В работе [Mishin et al., 2012] для подтверждения этой гипотезы были проведены оценки периода Брента-Вяйсяля для этих высот. Эти периоды составили 13 мин для высоты 350 км и 18 мин для высоты 500 км. Поэтому на том же графике рис. 5 приведён спектр акустических колебаний, регистрировавшихся в OULU. Из спектра вариаций давления видно, что колебания с периодом 18 мин отражены в вариациях давления и, следовательно, имеют акустическую компоненту. Как и предполагалось, период колебаний 40 мин относится к колебаниям глобальной токовой системы и не имеет выраженной акустической компоненты. Кроме названных выше, присутствует акустический сигнал с периодом немного более часа.



**Рис. 6.** Наложение высокочастотной части вариаций давления Oulu на вариации магнитного поля, зарегистрированные на ближайшей магнитометрической станции Oulujarvi (расстояние ~100 км) и ГФО ИДГ РАН «Михнево»

Рассмотрим волновые формы колебаний данного периода времени. На рис. 6 приведены волновые формы, регистрируемые магнитометром в Oulujarvi и двумя акустическими датчиками. При наличии сдвигов во времени хорошо видно подобие колебательных форм (в частности колебаний в пунктирном прямоугольнике). Возникает впечатление, что при DP2 возмущении, терминаторные волны отражаются в магнитометрических данных. Некоторое запаздывание сигнала датчика университета OULU относительно ГФО «Михнево» объясняется более поздним приходом туда терминатора.

### Анализ вариаций амплитуды в данных ГФО «Михнево»

Из анализа предыдущего раздела ясно, что магнитометрический сигнал складывается из двух компонент различного происхождения. Один из них связан с модификацией глобальной токовой системы (возникающие под действием этой дополнительной системы токов области нагрева плазмы, дополнительные конвективные потоки имеют существенное значение только в высоких широтах). Уже на широте EISCAT их вклад в движение ионосферы незначителен. Источником второй компоненты сигнала являются те ионосферно-магнитосферные конвективные потоки, магнитогидродинамические движения, которые отражаются в наземных магнитометрических сигналах (за счёт замыкания поляризационных токов на ионосфере) и акустических данных. При магнитогидродинамических движениях в ионосфере (движениях поперек геомагнитного поля), возникают поляризационные электрические поля, генерирующие поляризационные токи вдоль магнитного поля, замыкающиеся на электроджетных высотах и дающие вклад в магнитную вариацию. Временная зависимость амплитуды, принимаемого в ГФО «Михнево» низкочастотного сигнала, должна отражать временной ход источника. Если источник обусловлен токами на электроджетных высотах, то вариации амплитуды будут отражать весь спектр частот независимо от его природы. Если в основе возбуждения низкочастотных колебаний, уходящих на большие расстояния от стенда, лежит магнитогидродинамическое движение какой-то природы, то в сигнале отразятся только те частоты, которые соответствуют данному явлению. Поэтому на рис. 7 приведён спектр амплитуды принимаемого низкочастотного сигнала. Амплитуды принимаемого сигнала оказались наиболее чувствительны к высокочастотной компоненте магнитометрических колебаний с периодами 17, 19 и 23 мин, имеющих акустическую компоненту, как было показано выше (АГВ). На всех трёх пиках спектра сохраняется примерно одинаковое соотношение между амплитудами X и Y компонент принимаемого сигнала. При этом остальные периоды (40 мин и более часа) имеют уровень на порядок меньший.

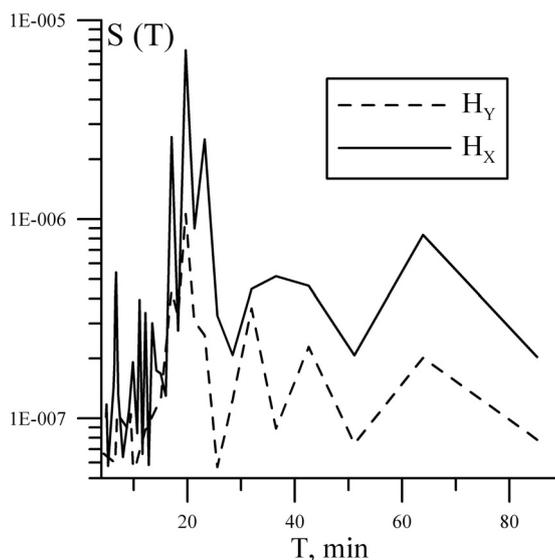
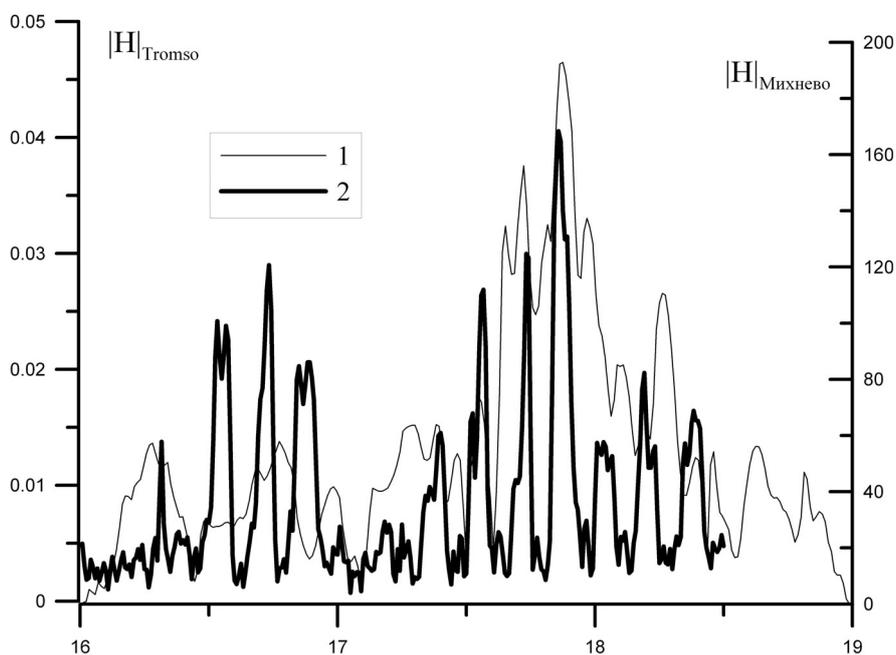


Рис. 7. Амплитудные спектры принимаемого в ГФО «Михнево» низкочастотного сигнала

Сопоставление вариаций магнитного поля на анализируемом временном отрезке приведено на рис. 8. в виде временной зависимости полной вариации магнитного поля в Tromsø (тонкая линия) и полной амплитуды сигнала, принимаемого в ГФО «Михнево» (толстая линия). Таким образом, можно сделать заключение о том, что низкочастотный демодулированный сигнал, принимаемый в обсерватории «Михнево» при модулированном нагреве ионосферы на стенде EISCAT, соответствует волновым магнитогидродинамическим колебаниям с периодами порядка 20 мин, имеющими, по-видимому, акустико-гравитационную природу и не отражает полную частотную картину изменений ионосферного тока, что косвенно подтверждает гипотезу Papadopoulos.



**Рис. 8.** Вариации принимаемого в ГФО «Михнево» низкочастотного сигнала (толстая линия). Вариации магнитного поля в Tromsø по данным магнитометра (тонкая линия)

### Заключение

Из приведённого ранее анализа очевидно, что ведущую роль в определении амплитуд сигнала имеют колебательные магнитогидродинамические движения ионосферы, имеющие акустико-гравитационную составляющую и периоды порядка 17–23 мин. К таким магнитогидродинамическим волнам относятся терминаторные волны на высотах F-области ионосферы [Afraimovich, 2009; Astafyeva, Afraimovich, Voeikov, 2008; Афраймович, Едемский, Воейков, Ясюкевич, Живетьев, 2010]. Это косвенно подтверждает гипотезу Papadopoulos о том, что механизм демодуляции связан с волновыми возмущениями ионосферы, а не с током электроджета. К тому же, по-видимому, для активизации процесса демодуляции необходимы волновые возмущения с достаточно короткими периодами (около 20 мин.).

Для дальнейшей верификации данного вывода необходимо разделить эффекты от прохождения сигнала к точке регистрации и эффекты генерации. Для этого необходима регистрация сигнала в нескольких разнесённых точках.

В дальнейшем желательно провести серию экспериментов на терминаторе. При этом необходимо учитывать, что сигналы магнитных вариаций, полученные 20 февраля, реализуются достаточно редко. Видимо, не всегда реализуется и возбуждение интенсивной АГВ/ВГВ волны. Направление излучения низкочастотных волн так же может зависеть от направления этой волны. Набор необходимой статистики при проведении измерений по приёму сигнала, рождённого на терминаторе, с одновременной регистрацией акустического сигнала и всех возможных характеристик терминаторного возмущения позволил бы сделать более точные заключения о высоте генерации сигнала и продвинуться в понимании его механизма.

### *Литература*

*Afraimovich E.L.* First GPS-TEC evidence for the wave structure excited by the solar terminator // *Earth Planet Space* 2008. V. 60. P. 895–900.

*Astafyeva E.I., E.L. Afraimovich, S.V. Voeikov,* Generation of secondary waves due to intensive large-scale AGW traveling // *Advances in space res.* 2008. T. 41, c. 1459–1462.

*Афраймович Э.Л., И.К. Едемский, С.В. Воейков, Ю.В. Ясюкевич, И.В. Живетьев,* МГД природа ионосферных волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором // *Геом. Аэрон.* 2010. Т. 50 № 1, с. 82–99.

*Jin G., M.Spasojevic, U.S.Inan* Relationship between electrojet current strength and ELF signal intensity in modulated heating experiments // *J.Geophys. res.* 2009. V. 114 A08301, doi:1029/2009JA014122.

*Mishin, E., Sutton, E., Milikh, G., Galkin, I., Roth, C., Förster, M.* F2region atmospheric gravity waves due to high power HF heating and subauroral polarization streams. // *Geophysical Research Letters* 2012. V. 39. N. 11. DOI: 10.1029/2012GL052004

*Nishida A.* Geomagnetic DP2 fluctuations and associated magnetospheric phenomena // *J. Geophys.Res.* 1968. V. 73. P. 1795–1803.

*Nishida A.* Geomagnetic DP2 fluctuations and associated magnetospheric phenomena // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P 5549–5559.

*Nishida A.* DP2 and polar substorm // *Planet. Space Sci.* 1972. V. 19. P. 205–221.

*Kikuchi T., H. Luhr, T. Kitamura, O. Saka, K. Schlegel* Direct penetration of the polar electric field to the equator during a DP2 event as detected by the auroral and equatorial magnetometer chains and the EISCAT radar // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. N. A8. P. 17161–17173.

*Kikuchi T., Y. Ebihara, K.K. Hashimoto, R. Kataoka, T. Hori, S. Watari, Nishitani N.* Penetration of the convection and overshielding electric fields to the equatorial ionosphere during a quasiperiodic DP2 geomagnetic fluctuation event // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A05209, doi:10.1029/2008JA013948.

*Kobea A.T., A.D. Richmond, B.A. Emery, C. Peymirat, H. Luhr, T. Moretto, M. Hairston, C. Amory-Mazaudier.* Electrodynamical coupling of high and low latitudes: Observations on May 27, 1993 // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. A10, PP.22979–22989.

*Motoba T., T. Kikuchi, H. Luhr, H. Tachihara, T.-I. Kitamura, K. Hayashi, T. Okuzawa.* Global Pc5 caused by a DP 2 – type ionospheric current system // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. A2,1032, doi:10.1029/2001JA900156.

*Papadopoulos, Chang,* 16<sup>th</sup> annual RF Ionospheric Interactions workshop, april 20, 2010.

*Zaka K.Z., A.T. Kobea, P. Assamoi, O.K. Obrou, V. Doumbia, K. Boka, B.J.-P. Adohi, N.M. Mene.* Latitudinal profile of the ionospheric disturbance dynamo magnetic signature: comparison with the DP2 magnetic disturbance // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 3523–3536.