

УДК 550.385.1

## ПОИСК СКРЫТОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ В МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ, ПРОВОДИМЫХ ВО ВРЕМЯ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

© 2011 г. В. И. Бадин

Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: badin@izmiran.ru

Поступила в редакцию 27.05.2009 г.

После доработки 14.07.2010 г.

Предложена методика выявления дискретных эквидистантных спектров в высокоширотных магнитных наблюдениях. Методика находит приближенные решения классической задачи Шустера, отыскивающей скрытую периодичность в наблюдениях со значительным присутствием шумов. Использование разностных сигналов позволяет повысить широтное разрешение магнитометрической диагностики. С помощью предложенной методики обнаружены эквидистантные спектры двух различных типов. Спектры первого типа интерпретируются как частоты связанных продольно-поперечных магнитогидродинамических колебаний в магнитосферной полости. Происхождение спектров второго типа можно связать с вращающимся источником — мелкомасштабным вихрем магнитосферной конвекции. Такая интерпретация учитывает доплеровский сдвиг частоты, обусловленный увлечением ионосферного нейтрального газа магнитосферной конвекцией. Полученные результаты поддерживают вывод о стабильности дискретных авроральных частот в возмущенных условиях.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Полярные сияния обычно связывают с продольными токами, текущими вдоль высокоширотных магнитных силовых линий [Лайонс, Уильямс, 1987]. Продольные токи, в свою очередь, являются частью токовых систем, включающих как магнитосферные, так и ионосферные токи [Пудовкин и др., 1975; Iijima and Potemra, 1978]. Временные вариации ионосферных токов обычно изучают по данным наземных магнитометров. Пространственное распределение, поляризационные и спектральные свойства длиннопериодных геомагнитных пульсаций, наблюдаемых в различных фазах магнитных бурь, изучались многими исследователями (например, [Клейменова и др., 1996; Козырева и др., 2006; Клейменова, Козырева, 2007]).

Альтернативным средством исследования спектральных характеристик магнитосферных процессов являются доплеровские измерения, с помощью высокочастотных радаров. Данный метод позволяет непосредственно определять скорость дрейфа ионосферной плазмы, т.е. величину поперечного электрического поля. Доплеровские измерения, проводимые, в том числе, при длительных наблюдениях полярных сияний, обнаружили дискретные ультранизкие частоты 1.3, 1.9, 2.6, 3.2–3.4 и, вероятно, 0.6–0.8 мГц [Samson et al., 1991, 1992]. Такие же, или очень близкие, частоты выявляются и по данным магнитометров [Иванов и др., 1994]. Эти частоты часто обладают хорошо выраженной стабильностью, т.е. остаются практически неизменными от события к событию. Тем не менее, тщательный анализ маг-

нитных наблюдений, проведенный на большом статистическом материале, дал повод усомниться в стабильности дискретных авроральных частот [Ziesolleck and McDiarmid, 1995]. С другой стороны, стабильность таких частот нашла неожиданное подтверждение в низкоширотных геомагнитных наблюдениях [Francia and Villante, 1997], см. также обзор [Takahashi, 1998].

Большой интерес представляет физическое происхождение дискретных авроральных колебаний. Если такие частоты действительно стабильны, целесообразно связать их возбуждения с каким-либо внутримангнитосферным источником. Было предложено [Samson et al., 1992] отождествить эти волны с собственными частотами магнитосферной полости, между магнитопаузой и плазмопаузой. Однако большое число наблюдений, теоретические оценки, а также модели, обобщающие этот материал, дают для типичных резонансных магнитосферных частот значения выше 4–5 мГц (например, [Singer et al., 1981; Lee and Lysak, 1989]), что заметно превышает обнаруженные доплерометрические величины. С другой стороны, если данные частоты не являются стабильными, их происхождение можно связать с прямым воздействием солнечного ветра на магнитосферу [Korotova and Sibeck, 1995; Kepko and Spence, 2003]. Колебания динамического давления солнечного ветра вызовут соответствующие вариации тока Чепмена-Ферраро, что, в конечном итоге, приведет к аналогичным геомагнитным вариациям.

Важно подчеркнуть, что для идентификации физического объекта — источника дискретных частот —

недостаточно выделить какой-либо монохроматический сигнал. Необходимо получить представление о спектре в целом как о последовательности дискретных частот, подчиненных определенной математической закономерности. Общий подход к проблеме выявления и идентификации дискретных спектров возвращает нас к классическим работам Шустера [например, Марпл, 1990], т.е. к задаче поиска скрытой периодичности. Скрытая периодичность, если ее удастся обнаружить, выявит частоты, составляющие дискретный спектр источника сигналов, что позволит судить о самом источнике.

Основная цель данной работы состоит в том, чтобы выявить дискретные спектры, содержащиеся в авроральных магнитометрических наблюдениях. Для того чтобы судить о стабильности и о происхождении дискретных авроральных частот, необходимо сравнить полученные спектры с дискретными частотами, обнаруженными ранее, в частности с доплерометрическими частотами, обнаруженными при радарных наблюдениях за полярными сияниями [Samson et al., 1991].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ИХ ОБРАБОТКИ

Применение спектрального анализа к результатам измерений обычно предполагает, что временной ряд данных является стационарным, или достаточно близким к стационарному. В данной работе анализируются измерения магнитного поля, полученные меридиональной цепочкой магнитовариационных станций IMAGE. Если в изучаемом авроральном событии полярное сияние двигалось вдоль меридиана, перемещаясь на значительное расстояние, такое событие едва ли обеспечит стационарный временной ряд на фиксированной широте. Следовательно, подобные события необходимо исключить из рассмотрения. Этого можно добиться, используя кеограммы полярных сияний, полученные камерами полного обзора неба (см. [www.ava.fmi.fi/MIRACLE/ASC/](http://www.ava.fmi.fi/MIRACLE/ASC/)). Кеограммы полярных сияний позволяют отобразить авроральные события, в которых полярное сияние длительное время находилось вблизи фиксированной широты. Данная работа анализирует четырехчасовые ряды 10-с измерений, что составляет 1440 измерений, полученных каждым магнитометром в ходе каждого исследуемого события.

Дальнейшая обработка исходных наблюдений состоит в переходе к магнито-разностным сигналам. Магнито-разностный сигнал представляет собой разность меридиональных составляющих магнитного поля, измеренных на соседних станциях меридиональной цепочки, т.е. фактически анализируются данные последовательных пар высокоширотных магнитометров. Магнито-разностный сигнал выделяет магнитную вариацию, обусловленную ионосферным током, текущим в узком интервале широт между двумя станциями, и ослабляет

вклад удаленных источников магнитного поля. Переход к магнито-разностным сигналам мотивирован следующими соображениями о возможных источниках сигнала. Во-первых тем, что полярное сияние наблюдалось практически на фиксированной широте. Во-вторых, известными представлениями о резонансах магнитных силовых линий: частота резонанса определяется длиной силовой линии, которая сильно зависит от широты. Среднее арифметическое магнито-разностное сигнала вычитается, выделяя магнитную вариацию с нулевым средним. Таким образом, каждая пара соседних магнитометров дает временной ряд для спектрального анализа. Использование магнито-разностных сигналов позволяет повысить широтное разрешение магнитных наблюдений.

Далее необходимо из каждого временного ряда выделить дискретные частоты, которые могли бы соответствовать собственным колебаниям магнитосферной колебательной системы. Этого было бы несложно добиться, если бы нам удалось найти такой фильтр, который сохранил бы в исследуемом сигнале синусоиды на частотах дискретного спектра и устранил (ослабил) бы другие сигналы, искажающие искомую периодичность.

Предположим, что нам удалось найти такой, почти идеальный фильтр. В этом случае результат спектрального анализа хорошо известен и представляет собой точное решение модельной задачи поиска скрытой периодичности [Priestley, 1981, § 6.1.3]. А именно, спектральная мощность в этом случае содержит ядра Фейера  $F_N(\omega \pm \omega_i)$ , центрированные на частоты скрытой периодичности  $\omega_i$ . Ядро Фейера  $F_N(\theta) = \sin^2(N\theta/2)/2\pi N \sin^2(\theta/2)$  представляет собой дельтаобразную функцию, которая стремится к  $\delta$ -функции Дирака, когда число наблюдений  $N$  стремится к бесконечности. Разумеется, спектральная плотность мощности в этом случае всюду положительна.

Теперь вспомним, что плотность мощности взвешенной спектральной оценки

$$h(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} I_{N,x}(\theta) W(\omega - \theta) d\theta \quad (1)$$

[Priestley, 1981, § 7.1] представляет собой свертку периодограммы

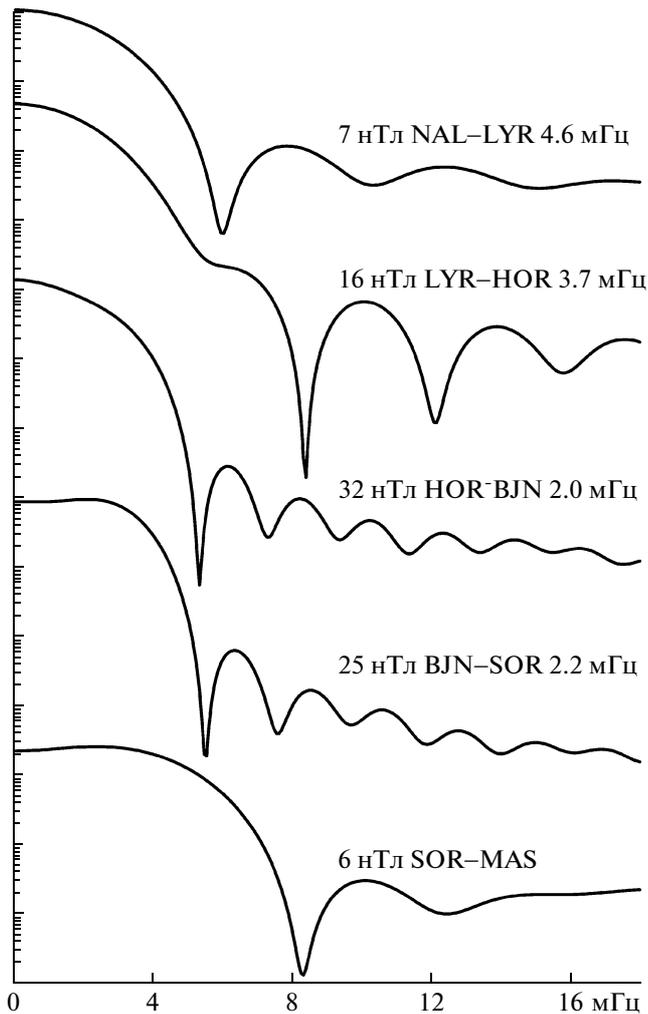
$$I_{N,x}(\theta) = \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{t=1}^N X_t \exp(-it\theta) \right|^2$$

со спектральным окном  $W(\theta)$ . В данной работе используется окно Тьюки-Хэннинга

$$W(\theta) = \frac{1}{4} D_M(\theta - \pi/M) + \frac{1}{2} D_M(\theta) + \frac{1}{4} D_M(\theta + \pi/M),$$

где  $D_M(\theta) = \sin[(M+1/2)\theta]/2\pi \sin(\theta/2)$  – ядро Дирихле,  $M$  – число измерений, на котором спектральное

Ненормированная спектральная мощность



**Рис. 1.** Ненормированная спектральная мощность магнито-разностных сигналов в спокойных условиях 22.12.2005 г. Над каждой спектрограммой приведены: максимум модуля магнито-разностного сигнала в нТл, международные коды магнитовариационных станций каждой пары и частотное расстояние между соседними спектральными пиками (основная частота эквидистантного спектра) в МГц.

окно обрывает автокорреляции (максимальная длина корреляции). Отметим, что формула (1) определяет фильтрацию периодограммы, где спектральное окно  $W(\theta)$  является фильтром.

Для того чтобы решить задачу Шустера и выявить скрытую периодичность в исследуемом сигнале, необходимо настроить фильтр (выбрать ширину спектрального окна) таким образом, чтобы спектральная мощность содержала хорошо выраженные дельтаобразные пики, оставаясь всюду положительной. В рамках предложенной методики, наиболее выраженные спектральные пики выявляются в том случае, когда выбирается наибольшая ширина окна, при которой плотность мощности остается еще

всюду положительной. Такой метод взвешенной спектральной оценки предлагается для решения поставленной задачи. Предварительные результаты и доводы в пользу данного метода докладывались на конференциях [Бадин, 2008; Badin, 2007, 2008]. Отметим, что отрицательные мощности обычно свидетельствуют о недостаточном разрешении спектрального окна [Отнес и Эноксон, 1982].

### 3. АНАЛИЗ АВРОРАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

Первое из анализируемых событий представляет собой четырехчасовой интервал 14:00–18:00 UT 22.12.2005 г. очень низкой активности авроральной электроструи, характеризуемой индексом сети IMAGE  $IE < 40$  нТл ([www.ava.fmi.fi/image/il\\_index](http://www.ava.fmi.fi/image/il_index)).  $IE$  индекс электроструи определяется аналогично  $AE$  индексу, но по станциям сети IMAGE. Геомагнитные условия определялись северным межпланетным магнитным полем (ММП)  $B_z > 0$  и индексом активности  $Kp \approx 0$ . Плотность и скорость солнечного ветра (по данным OMNI) составляли  $N \approx 4$  см<sup>-3</sup> и  $V \approx 440$  км/с соответственно. Спектрограммы, полученные для пяти пар магнитовариационных станций, представлены на рис. 1. Над каждой спектрограммой приведены максимум модуля магнито-разностного сигнала в нТл, международный код станций каждой пары и частотное расстояние между соседними спектральными пиками в МГц. Широта станций возрастает снизу вверх.

Спектральные пики каждой спектрограммы выявляют приблизительно эквидистантные спектры выделенных частот. Однако эти спектры отличаются от простых гармонических тем, что все спектральные пики значительно сдвинуты в область более высоких частот. Величина частотного сдвига по отношению к стандартному гармоническому спектру (у которого все частоты пропорциональны основной частоте) позволяет идентифицировать спектры двух различных типов. Условимся называть спектрами первого типа такие, у которых величина частотного сдвига превосходит расстояние между соседними пиками, т.е. превосходит частотный шаг или основную частоту эквидистантного спектра. Спектры, у которых величина частотного сдвига меньше расстояния между соседними пиками, будем называть спектрами второго типа.

Рассмотрим, например, спектрограмму HOR-BJN на рис. 1. Здесь частота первой гармоники составляет 6.2 МГц, частотное расстояние между соседними пиками составляет 2.0 МГц. Вычитая из первой величины вторую, получим  $6.2 - 2.0 = 4.2$  МГц, что превосходит 2.0 МГц. Следовательно, этот спектр относится к первому типу. Обратимся теперь к спектрограмме NAL-LYR рис. 1. Здесь частота первой гармоники составляет 7.9 МГц, а частотное расстояние между соседними пиками 4.6 МГц. Вычитая из первой величины вторую, получим  $7.9 - 4.6 = 3.3$  МГц, что меньше чем 4.6 МГц. Следовательно, этот спектр относится ко

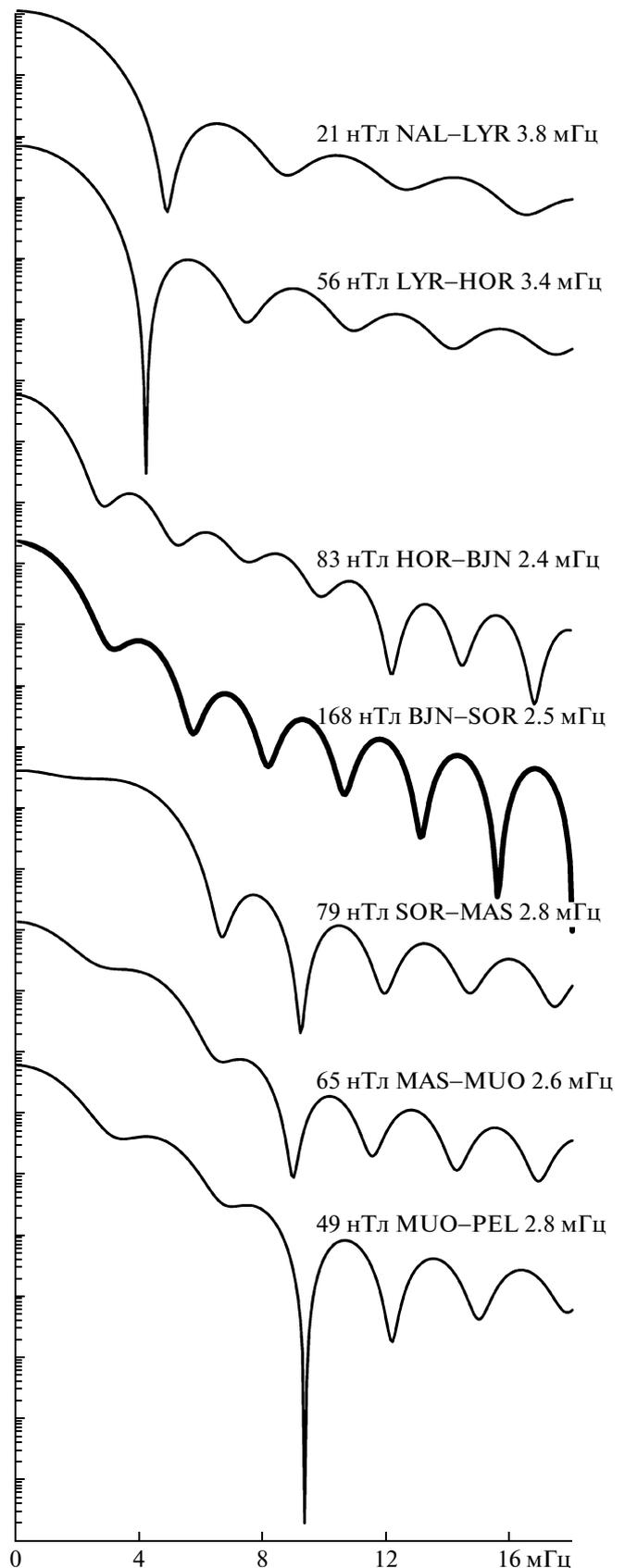
**Рис. 2.** Ненормированная спектральная мощность магнито-разностных сигналов в слабовозмущенных условиях 01.01.2000 г. при северном ММП. Обозначения аналогичны таковым на рис. 1. Спектрограмма, полученная предположительно под дугой сияния, показана жирной линией.

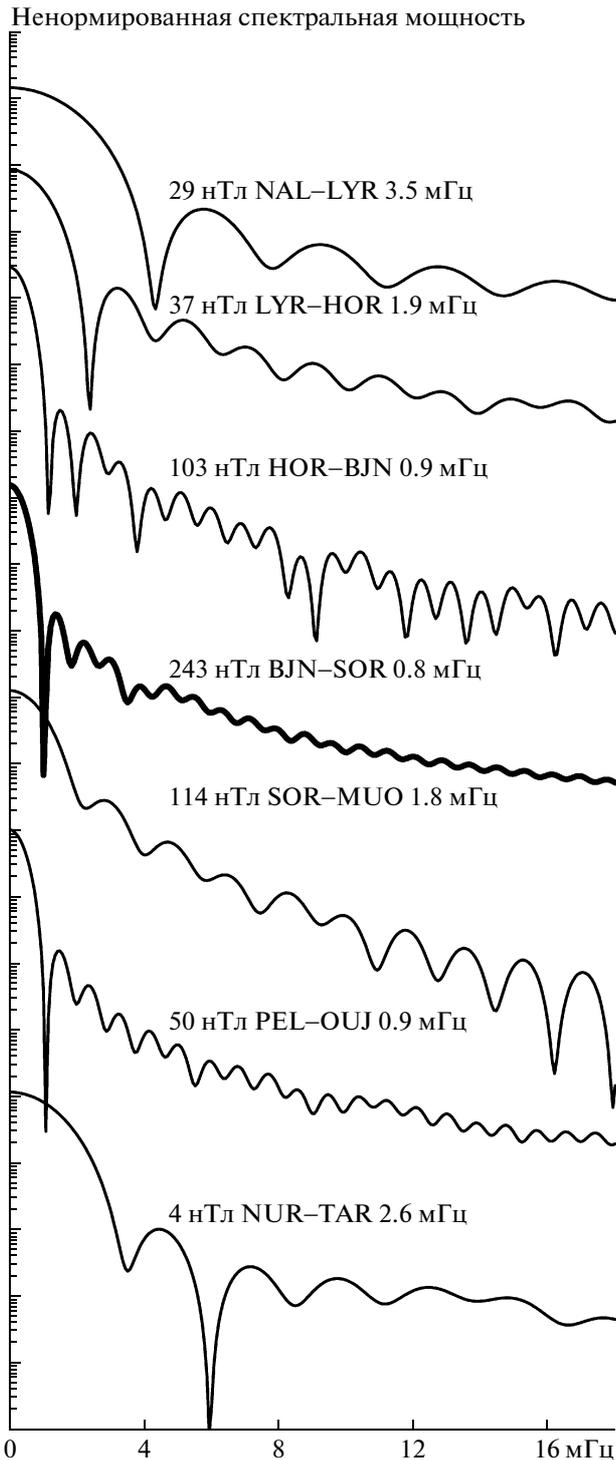
второму типу. В данном событии, соответствующем спокойным геомагнитным условиям, спектр второго типа обнаруживается на полярной кромке меридиональной цепочки магнитометров. Отметим, что частоты всех спектральных пиков превосходят 5 мГц, что хорошо согласуется с наблюдениями резонансных сигналов и моделями резонансных спектров [Singer et al., 1981; Lee and Lysak, 1989].

Второе авроральное событие наблюдалось в интервале 12:00–16:00 UT 01.01.2000 г. умеренной активности авроральной электроструи  $IE < 200$  нТл при северном ММП  $B_z > 0$  и  $Kp \approx 4$ . Плотность и скорость солнечного ветра составляли  $N \approx 2 \text{ см}^{-3}$  и  $V \approx 700 \text{ км/с}$  соответственно. Спектрограммы для этого события показаны на рис. 2. Обозначения аналогичны обозначениям рис. 1. Дуга полярного сияния наблюдалась между станциями BJN и SOR, и эта спектрограмма показана жирной линией (камеры полного обзора неба позволяют надежно определить широту сияния в том случае, когда сияние находится в зените, что бывает довольно редко; это обстоятельство, однако, не имеет большого значения, поскольку все пары магнитометров анализируются по одной и той же методике). Частотные пики каждой спектрограммы расположены достаточно произвольным образом, однако расстояния между соседними пиками, т.е. основные частоты эквидистантных спектров, оказываются достаточно близкими к дискретным авроральным частотам, обнаруженным доплеровским методом [Samson et al., 1992], или совпадают с ними. Рисунок 2 показывает, что к полюсу от дуги сияния выявляются спектры второго типа. Основная частота спектров второго типа возрастает по направлению к полюсу. Спектры первого типа обнаруживаются к экватору от дуги сияния.

Третье из исследуемых авроральных событий соответствует активности  $IE < 400$  нТл,  $Kp \approx 3$  при южном ММП  $B_z < 0$  и параметрах солнечного ветра  $N \approx 4 \text{ см}^{-3}$ ,  $V \approx 500 \text{ км/с}$ , которые наблюдались в течение 14:00–18:00 UT 12.01.2004 г. Спектрограммы для этого случая показаны на рис. 3. Как и в предыдущем случае, спектральные пики расположены достаточно произвольным образом, однако частотное расстояние между соседними пиками, т.е. основная частота эквидистантного спектра, во всех случаях либо совпадает с дискретной доплерометрической частотой [Samson et al., 1992], либо достаточно близка к последней. Наиболее сильный сигнал, полученный, возможно, под дугой полярного сияния, дает спектрограмму BJN-SOR, которая показана на рис. 3 жирной линией. По обе стороны от дуги сия-

Ненормированная спектральная мощность





**Рис. 3.** Ненормированная спектральная мощность магнито-разностных сигналов в слабозмущенных условиях 12.01.2004 г. при южном ММП. Обозначения аналогичны таковым на рис. 1 и 2.

ния обнаруживаются спектры второго типа, за исключением, может быть, экваториальной кромки меридиональной цепочки магнитометров (NUR-TAR). Основная частота эквидистантных спектров

возрастает более чем в 4 раза по направлению от дуги к полюсу. Интересно отметить, что к экватору от дуги сияния обнаруживается локальное возрастание основной частоты спектров второго типа (спектрограмма SOR-MUO). По сравнению со спокойными условиями, минимальные частоты выявленных спектральных пиков почти пятикратно уменьшаются при южном ММП.

Для того чтобы оценить стабильность обнаруженных частот, необходимо количественно сравнить отклонение основной частоты эквидистантного спектра от ближайшей доплерометрической частоты с погрешностью взвешенной спектральной оценки. Результаты такого сравнения представлены в нижеследующей таблице, где  $\delta$  обозначает относительное отклонение основной магнитометрической частоты  $f_m$  от ближайшей доплерометрической  $f_D$ ,  $\delta = |f_m - f_D|/f_m$ , а  $\sigma$  обозначает относительную среднеквадратичную погрешность, обусловленную дисперсией взвешенной спектральной оценки  $\sigma = (3M/4N)^{1/2}$  [Priestley, 1981]. Порядковый номер каждой пары станций отсчитывается от высоких широт к низким. Сравнение проводится только для возмущенных условий, когда наблюдались сияния. Это сравнение показывает, что отклонение магнитометрических частот от доплерометрических не превосходит погрешности спектральной оценки, обусловленной дисперсией. Следовательно, полученные результаты (14 спектрограмм) поддерживают вывод о стабильности дискретных авроральных частот в возмущенных условиях.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Высокоширотные магнитные наблюдения содержат низкочастотные вариации различного происхождения. Например, возможным источником вариаций являются “меандрические” движения электроструи [Иванов и др., 1994]. Кеограммы, полученные камерами полного обзора неба, показывают, что пространственные перемещения сияния неизбежно накладываются на временные вариации электрического тока, что вносит в магнитограмму различные комбинационные частоты. Наличие в спектре магнитных вариаций подобных частот различного происхождения существенно усложняет анализ и затрудняет идентификацию возможных источников сигнала. Успешный анализ спектра возможен в том случае, если удастся выделить основные частоты, отфильтровав прочие частоты как шумы. Для решения такой задачи используют изошранные методы фильтрации данных. Например, ряд исследователей использовали выделение сильно-поляризованных сигналов [Samson et al., 1991; Ziesolleck and McDiarmid, 1995]. Такая методика позволяет выделять частоты, связанные с резонансами магнитных силовых линий. В то же время, другие исследователи отмечают, что ряд наблюдений не согласуется с тео-

Отклонение основных частот эквидистантных магнитометрических спектров от дискретных авроральных частот  $f_D$ , обнаруженных радарными наблюдениями

№ п/п	01.01.2000			12.01.2004		
	$f_D$ , мГц	$\delta$ , %	$\sigma$ , %	$f_D$ , мГц	$\delta$ , %	$\sigma$ , %
1	3.4	10.5	11.6	3.4	2.9	12.3
2	3.4	0	12.5	1.9	0	16.4
3	2.6	8.3	15.0	0.8	11.1	24.2
4	2.6	4	14.4	0.8	0	25.1
5	2.6	7.1	13.7	1.9	5.6	17.2
6	2.6	0	13.9	0.8	11.1	24.3
7	2.6	7.1	13.5	2.6	0	14.1

рией резонансов магнитных силовых линий [Клейменова и др., 1996; Клейменова и Козырева, 2007].

Предложенный в данной работе метод использует специальную настройку фильтра на каждый временной ряд. Анализ полученных результатов показывает, что специальный выбор фильтра сводится к настройке ширины спектрального окна  $2\pi/M$  на частотное расстояние между соседними пиками  $|\omega_2 - \omega_1|$  [Priestley, 1981, § 7.3.2], т.е.  $M \approx (|f_2 - f_1| \Delta t)^{-1}$  (здесь  $f_{1,2}$  — частоты в герцах, а  $\Delta t$  — интервал между измерениями в секундах), так чтобы ширина окна оказалась чуть меньше расстояния между соседними пиками. Такая настройка окна сглаживает тонкие детали спектра между пиками дискретных частот, тем самым ослабляя вклад соответствующих помех и приближая исходный сигнал к модельному сигналу классической задачи Шустера [Priestley, 1981, § 6.1.3]. Полученная спектрограмма представляет собой решение задачи Шустера методом Тьюки. Настройка фильтра на каждый временной ряд осуществляется единственным образом, что определяет единственное решение поставленной задачи. Это решение учитывает пожелания Шустера о сглаживании/усреднении периодограммы. Отрицательные мощности окна Тьюки облегчают настройку фильтра, сокращая затраты труда на обработку данных. Решение задачи окажется вполне успешным, если скрытая периодичность в частотной области имеет вид эквидистантного спектра или достаточно близка к такому спектру. В этом случае настройка фильтра применима ко всему спектру и может воспроизвести искомые дискретные частоты.

Разумеется, необходимо преобразовать исходные измерения таким образом, чтобы каждый временной ряд содержал преобладающий эквидистантный спектр. По-видимому, этого можно добиться, отбирая с помощью кеограмм полярных сияний такие события, в которых сияние длительное время находилось вблизи фиксированной широты, и формируя магнито-разностные сигналы для каждой пары соседних магнитометров. Из рис. 2 и 3 мы видим, что

источники различных частот находились на разных широтах. Если бы сияние и связанные с ним токи перемещались на значительное расстояние вдоль меридиана, на фиксированных широтах (где находятся магнитометры) одни источники сменялись бы другими источниками с другими частотами, что привело бы к существенной нестационарности временных рядов. Чтобы обеспечить корректность анализа, желательно отбирать такие события, в которых широтное положение источников различных спектров оставалось бы в пределах одних и тех же пар магнитометров в течение всего исследуемого интервала времени.

Рис. 4 показывает магнитовариационные сигналы индивидуальных магнитометров станций NAL и LYR, а также магнито-разностный сигнал этой пары магнитометров для аврорального события, которое наблюдалось в течение 14:00–18:00 UT 12.01.2004 г. Мы видим, что в индивидуальных сигналах магнитометров NAL и LYR (как и в индивидуальных сигналах большинства магнитометров меридиональной цепочки для данного события) преобладает магнитное поле наиболее сильного ионосферного тока. Это магнитное поле демонстрирует характерную частоту менее 1 мГц, что позволяет, согласно рис. 3, связать происхождение преобладающего сигнала с ионосферным током, текущим вблизи дуги полярного сияния. В то же время, магнито-разностный сигнал в значительной мере ослабляет вклад преобладающего магнитного поля наиболее сильного тока и выделяет более высокую частоту, связанную с ионосферными токами, текущими на более высоких широтах. Эти ионосферные токи, скорее всего, вызваны электрическим полем магнитосферного происхождения и несут дополнительную информацию о магнитосферных процессах, вызывающих магнитные вариации и формирующих полярные сияния. Таким образом, использование магнито-разностных сигналов существенно повышает диагностические возможности меридиональной цепочки по сравнению с сигналами индивидуальных магнитометров.

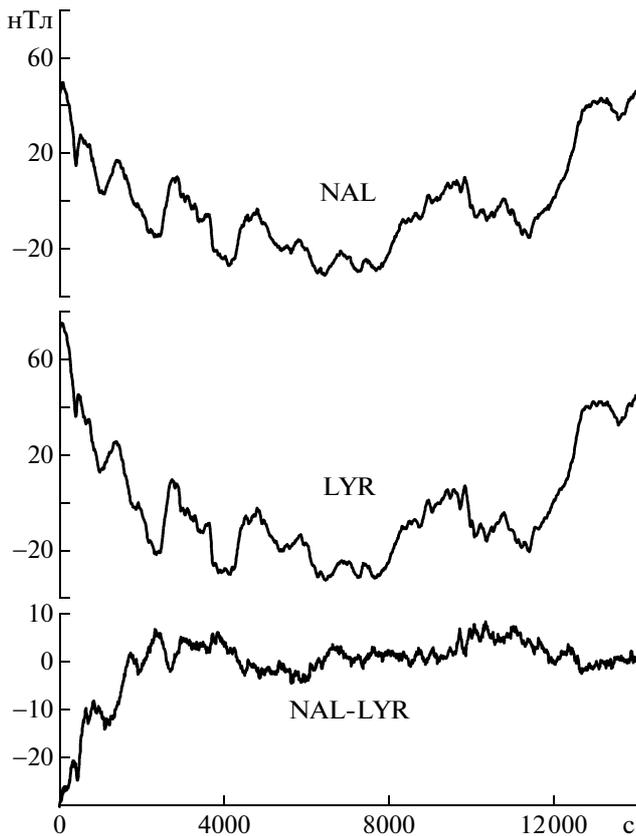


Рис. 4. Магнитные вариации по данным индивидуальных магнитометров и магнито-разностный сигнал.

Полученные спектрограммы выявили два различных типа эквидистантных спектров. Это спектры первого типа, у которых сдвиг спектра в область более высоких частот превосходит частотное расстояние между соседними пиками, и спектры второго типа, частотный сдвиг которых меньше расстояния между соседними пиками. Различные типы спектров указывают на различные физические источники соответствующих сигналов. Что касается спектров первого типа, то их происхождение естественно отнести к связанным продольно-поперечным магнитогидродинамическим (МГД) модам магнитосферной полости [Kivelson and Southwood, 1986]. У таких связанных колебаний сдвиг спектра в область более высоких частот определяется, прежде всего, распространением продольной магнитозвуковой волны поперек магнитных силовых линий, в то время как частотное расстояние между соседними пиками определяется, в основном, распространением поперечной альвеновской волны вдоль магнитного поля. Поскольку поперечный размер магнитосферной полости существенно меньше длины магнитной силовой линии между двумя сопряженными ионосферами, сдвиг спектра в область более высоких частот оказывается больше,

чем расстояние между соседними пиками. Полученные спектрограммы показывают, что пиковые частоты спектров первого типа (т.е. частоты самих спектральных пиков, а не расстояния между ними) выше 5 мГц. Такой результат хорошо согласуется с наблюдениями и известными моделями резонансных магнитосферных частот [Singer et al., 1981; Lee and Lysak, 1989].

Происхождение спектров второго типа, т.е. тех, которые дают частоты 0.8, 1.9, 2.6 и 3.4 мГц, скорее всего, совершенно иное. Если бы спектр второго типа был стандартным гармоническим спектром с пропорциональными частотами, его происхождение можно было бы связать с каким-либо вращающимся объектом. На первый взгляд, такой интерпретации препятствует сравнительно небольшой сдвиг спектра в область более высоких частот. Проанализируем подробнее, каким образом осуществляются магнитные измерения в высоких широтах. При изучении конвекции плазмы в ионосфере было достаточно надежно установлено, что в высоких широтах нейтральная атмосфера слоя *E* увлекается магнитосферной конвекцией и вращается в том же направлении, что и магнитосферная плазма в вихре конвекции [Fedder and Banks, 1972; Мингалев, 1979]. В этом случае ионосфера как целое движется относительно наземных магнитометров, а скорость движения нейтрального газа оказывается несколько ниже скорости движения магнитосферной плазмы. Вместе с ионосферой движется и ионосферный электрический ток. Если ионосфера движется в том же направлении, в котором происходит набег фазы электрического тока, эффект Доплера сдвинет спектр электрического тока в область более высоких частот.

Мы приходим к выводу, что источником спектров второго типа может быть вихрь магнитосферной конвекции. В этом случае вращение магнитосферной плазмы объяснит происхождение стандартного гармонического спектра, в то время как наземные магнитные измерения дадут эквидистантный спектр, сдвинутый в область более высоких частот, т.к. все частоты спектра сместятся на одну и ту же величину. Величина доплеровского сдвига окажется меньше частотного расстояния между соседними пиками спектра, поскольку скорость нейтрального газа меньше скорости движения магнитосферной плазмы. В этом случае основная частота эквидистантного спектра (частотное расстояние между соседними пиками) отождествляется с частотой вращения магнитосферной плазмы, т.е., в конечном счете, с дрейфом плазмы в процессе конвекции. При скорости магнитосферной конвекции порядка 1 км/с частота 1 мГц дает радиус вращения около 160 км. Таким образом, предложенная интерпретация результатов связывает обнаруженные частоты со сравнительно мелкомасштабными вихрями конвекции. Мелкомасштабные вихри конвекции неоднократно наблюдались высокочастот-

ными радарными [Grocott et al., 2006], причем вдоль таких траекторий конвекции наблюдалось и усиление свечения атмосферы.

Предложенная интерпретация происхождения спектров второго типа связывает наблюдаемые ионосферные токи с продольными токами, излучаемыми мелкомасштабными вихрями конвекции. Область наблюдения спектров второго типа включает область дуги сияния (насколько об этом можно судить по кеограммам сияний). Это позволяет предположить, что происхождение наблюдаемых в данных событиях сияний связано с мелкомасштабными вихрями конвекции, а именно, с продольными токами, которые генерируются магнитосферной плазмой, вращающейся в таких вихрях. Важно также отметить, что такая интерпретация позволяет связать локальное возрастание основной частоты эквидистантного спектра к экватору от дуги сияния (см. рис. 3) с хорошо известным явлением поляризованного джета [Гальперин и др., 1973]. Возрастание основной частоты спектра по направлению к высоким широтам можно объяснить неоднородностью вращения плазменного вихря. Тенденция роста частоты по направлению к высоким широтам уже отмечалась ранее [Иванов и др., 1994].

Необходимо также обратить внимание на то обстоятельство, что динамическое давление солнечного ветра в исследуемых событиях изменялось от события к событию лишь незначительно. Следовательно, сильное, почти пятикратное, уменьшение частот спектров второго типа при переходе от спокойных условий к условиям с южным ММП невозможно объяснить изменением размеров магнитосферной полости (частоты МГД колебаний, конечно, зависят от плотности плазмы, однако недостаток экспериментальных данных по плотности не позволяет достоверно судить о том, как плотность плазмы в магнитосферной полости изменяется от события к событию). С другой стороны, такое уменьшение частот вполне можно объяснить увеличением поперечного размера (радиуса) магнитосферного вихря при переходе к южному ММП. Это обстоятельство можно считать еще одним доводом в пользу нерезонансного происхождения спектров второго типа.

Незначительные отклонения обнаруженных основных частот эквидистантных спектров от известных авроральных доплерометрических частот (см. таблицу), с одной стороны, указывают на умеренную погрешность предложенной методики, с другой стороны, поддерживают вывод о стабильности дискретных авроральных частот в возмущенных условиях. Конечно, более надежную оценку точности обеспечили бы комплексные магнитные и доплеровские измерения, возможно, такое комплексное исследование удастся в дальнейшем осуществить. Необходимо также отметить, что магнито-разностный сигнал на каждой широте содержит как частоты альвеновских волн, приходящих вдоль магнитного поля из

магнитосферы, так и частоты магнитозвуковых волн, распространяющихся поперек магнитного поля в ионосфере, что может создавать дополнительные трудности при интерпретации результатов.

## 5. ВЫВОДЫ

Предложена методика выявления дискретных частот эквидистантных спектров в высокоширотных магнитометрических наблюдениях. Методика основана на получении магнито-разностных сигналов и последующем выделении дискретных частот методом взвешенной спектральной оценки, использующим специальную настройку ширины спектрального окна на каждый временной ряд. Использование магнито-разностных сигналов повышает широтное разрешение и расширяет диагностические возможности магнитометрии как инструмента экспериментального исследования магнитосферных процессов. Полученные результаты поддерживают вывод о стабильности дискретных авроральных частот 0.8, 1.9, 2.6 и 3.4 мГц в возмущенных условиях.

Обнаружены дискретные спектры двух различных типов. Предложенная интерпретация отождествляет спектры первого типа с частотами продольно-поперечных магнитогидродинамических мод магнитосферной полости. Происхождение спектров второго типа можно связать с вращающимся источником — мелкомасштабным вихрем магнитосферной конвекции. Такая интерпретация учитывает доплеровский сдвиг частоты, обусловленный увлечением ионосферного нейтрального газа магнитосферной конвекцией.

Автор благодарит М.Г. Деминова за полезные обсуждения. Работа наблюдательной сети IMAGE обеспечивается институтами — участниками этого международного проекта. Данная работа поддержана РФФИ, проект 07-05-00104.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бадин В.И. Спектральный анализ авроральных токов // Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 2. С. 222–223. 2008.
- Иванов В.В., Петров В.Г., Зайцев А.Н. Частотно-временные характеристики параметров западной электроструи и структура спектров пульсаций  $P_{s6}$  // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 34. № 4. С. 116–122. 1994.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Зайцев А.Н., Одинцов В.И. Геомагнитные пульсации  $P_{s5}$  на глобальной сети обсерваторий в магнитную бурю 24 марта 1991 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 1. С. 52–61. 1996.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Дневные квазипериодические геомагнитные колебания в восстановительную фазу сильной магнитной бури 15 мая 2005 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 5. С. 616–623. 2007.
- Козырева О.В., Клейменова Н.Г., Левитин А.Е., Ватерманн Ю. Длиннопериодные геомагнитные

- пульсации в квази-сопряженных областях Арктики и Антарктики в магнитную бурю 16–17 апреля 1999 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 5. С. 657–670. 2006.
- *Лайонс Л., Уильямс Д.* Физика магнитосферы. М.: Мир, 1987. 312с.
- *Марпл-мл. С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
- *Мингалев В.С.* Влияние электрических полей на нейтральные ветры в полярной шапке // Исследование динамических процессов в верхней атмосфере. М.: Гидрометеоздат, 1979. С. 195–201.
- *Отнес Р.К., Энноксон Л.* Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
- *Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г.* Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 1: Полярные магнитные возмущения. Л.: Изд-во ЛГУ, 1975. 219 с.
- *Badin V.I.* Spectral studies of the auroral currents // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXX Annual Seminar, Apatity, 27.02–2.03.2007. P. 51–54.
- *Badin V.I.* Magnetometric spectra of auroral currents compared with the Doppler radar measurements // Problems of Geocosmos, Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. SPb. 26.05–30.05.2008. Eds. Troyan V.N., Hayakawa M., Semenov V.S. P. 24–28.
- *Fedder J.A., Banks P.M.* Convection electric fields and polar thermospheric winds // J. Geophys. Res. V. 77. P. 2328–2340. 1972.
- *Francia P., Villante U.* Some evidence of ground power enhancements at frequencies of global magnetospheric modes at low latitudes // Ann. Geophysicae. V. 15. P. 12–23. 1997.
- *Grocott A., Lester M., Parkinson M.L., Yeoman T.K., Dyson P.L., Devlin J.C., Frey H.U.* Towards a synthesis of substorm electrodynamics: HF radar and auroral observations // Ann. Geophysicae. V. 24. P. 3365–3381. 2006.
- *Iijima T., Potemra T.A.* Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms // J. Geophys. Res. V. 83. P. 599–615. 1978.
- *Керко Л., Спенсера Х.Е.* Observations of discrete, global magnetospheric oscillations directly driven by solar wind density variations // J. Geophys. Res. V. 108. P. 1257–1270. 2003.
- *Kivelson M.G., Southwood D.J.* Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances // J. Geophys. Res. V. 91. P. 4345–4351. 1986.
- *Korotova G.I., Sibeck D.G.* A case study of transient event motion in the magnetosphere and in the ionosphere // J. Geophys. Res. V. 100. P. 35–46. 1995.
- *Lee D.-H., Lysak R.L.* Magnetospheric ULF wave coupling in the dipole model: the impulsive excitation // J. Geophys. Res. V. 94. P. 17097–17103. 1989.
- *Priestley M.B.* Spectral analysis and time series. V. 1. London: Academic, 1981. 653 p.
- *Samson J.C., Hughes T.J., Creutzberg F., Wallis D.D., Greenwald R.A., Ruohoniemi J.M.* Observations of a detached, discrete arc in association with field line resonances // J. Geophys. Res. V. 96. P. 15683–15695. 1991.
- *Samson J.C., Harold B.G., Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Walker A.D.M.* Field line resonances associated with MHD waveguides in the magnetosphere // Geophys. Res. Lett. V. 19. P. 441–444. 1992.
- *Singer H.J., Southwood D.J., Walker R.J., Kivelson M.G.* Alfvén wave resonances in a realistic magnetospheric magnetic field geometry // J. Geophys. Res. V. 86. P. 4589–4596. 1981.
- *Takahashi K.* ULF waves: 1997 IAGA division 3 reporter review // Ann. Geophysicae. V. 16. P. 787–803. 1998.
- *Ziesolleck C.W.S., McDiarmid D.R.* Statistical survey of auroral latitude Pc 5 spectral and polarization characteristics // J. Geophys. Res. V. 100. P. 19299–19312. 1995.