

УДК 550.385.43

## СОПРЯЖЕННОСТЬ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПРИПОЛЮСНОЙ ЧАСТИ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА В ФАЗУ РАЗВИТИЯ СУББУРИ

© 1999 г. Л. И. Громова, Я. И. Фельдштейн, А. Е. Левитин, А. Графе

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, г. Троицк (Московская обл.)**Центр наук о Земле, Германия*

Поступила в редакцию 18.12.97 г. После доработки 17.07.98 г.

По данным меридиональной цепочки магнитометров в Скандинавии, станций Норд в Гренландии, Мирный и Комсомольская в Антарктике анализируются широтные распределения компонент геомагнитного поля. Особое внимание уделено расширению западной авроральной электроструи во время фазы развития авроральной суббури, возникающей на главной фазе или фазе восстановления магнитной бури. Положение западной электроструи в северном полушарии сравнивается с положением полярной кромки западной электроструи в южном полушарии. Показано, что характер протекания и интенсивность магнитных возмущений на фазе развития магнитосферной суббури практически идентичны в северном и южном полушариях. В период суббурь, протекающих на фоне главной фазы магнитной бури, максимум интенсивности западной электроструи перемещается из авроральной зоны в более высокие широты практически одинаково в двух полушариях. Для сравнения сопряженных явлений в северном и южном полушариях используется как модель магнитосферного поля Н. Цыганенко, так и параболоидная модель-И. Алексеева и др.

### ВВЕДЕНИЕ

В период магнитных бурь геофизические явления, характерные для широт овала полярных сияний, захватывают субавроральные и даже средние широты. Однако наряду с таким смещением к экватору в интервалы появления магнитосферных суббурь во время магнитных бурь происходит расширение к полюсу области, в которой наблюдаются активные геофизические явления – электроструя западного направления и активные формы полярных сияний [1]. Сопряженность геофизических явлений в двух полушариях наблюдалась даже в их полярных шапках. В настоящее время стало возможным проведение одновременных наблюдений аврорального свечения в крайнем ультрафиолете в двух полушариях со спутников [2] или в освещенном полушарии со спутника, а в затененном – с поверхности Земли [3]. Использовались также наблюдения за вторжениями авроральной плазмы в одном полушарии и авроральным свечением в другом. Однозначного ответа на вопрос о характере магнитных силовых линий, опирающихся на полярную шапку (замкнутые они или разомкнутые), не получено до сих пор [4–9].

Цель данного исследования – рассмотреть протекание магнитных возмущений на приполюсной кромке аврорального овала во время магнитных бурь по данным меридиональной цепочки магнитных станций в северном полушарии и сопоставить их интенсивность и характер протека-

ния с магнитными возмущениями в сопряженных областях южного полушария.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В северном полушарии использовались наблюдения магнитного поля на 15 станциях меридиональной цепочки от Нурмиярви через Скандинавию до Нью-Алесунда на Шпитцбергене (географические и исправленные геомагнитные широты и долготы всех станций приводятся в таблице) и станции Норд в Гренландии. Регистрация вариаций трех компонент геомагнитного поля осуществлялась в цифровом виде с дискретностью в 1 мин. Для южного полушария привлекались вариации магнитного поля на станциях Мирный и Комсомольская как в цифровом за 1995 г., так и в аналоговом виде за 1993 и 1994 гг. Аналоговые магнитограммы оцифровывались с шагом в 1 мин.

Вариации магнитного поля в горизонтальной плоскости в пунктах наблюдений ( $X$  и  $Y$  или  $H$  и  $D$ ) в отклонениях от спокойного уровня переводились в  $X'$ - и  $Y'$ -компоненты ( $X'$  – в направлении на исправленный геомагнитный полюс с географическими координатами  $\Phi = 81.26^\circ$ ,  $\Lambda = 277.95^\circ$  в северном и  $\Phi = -74.06^\circ$ ,  $\Lambda = 126.4^\circ$  в южном полушарии). Положительное направление для компоненты  $X'$  на север, для  $Y'$  на восток, для  $Z$  вдоль силовой линии магнитного поля в обоих полушариях.

Таблица координат магнитных обсерваторий

Обсерватория	Код	Географические		Исправленные геомагнитные	
		Широта	Долгота	Широта	Долгота
Комсомольская	KOM	-77.88°N	97.50°E	-82.11°	84.78°
Норд	NRD	81.60°	343.30°	80.75°	110.32°
Мирный	MIR	-66.55°	93.02°	-77.19°	122.18°
Нью-Алесунд	NAL	78.92°	11.95°	76.08°	112.44°
Лонгьербен	LOR	78.20°	15.82°	75.13°	113.17°
Хорсунд	HOR	77.00°	15.60°	74.04°	110.62°
Хоупен	HOP	76.51°	25.01°	72.94°	116.03°
Медвежий	BJN	74.50°	19.20°	71.35°	108.82°
Сороя	SOR	70.54°	22.22°	67.21°	106.91°
Тромсо	TRO	69.66°	18.94°	66.57°	103.47°
Кево	KEV	69.76°	27.01°	66.15°	109.93°
Маси	MAS	69.46°	23.70°	66.04°	107.10°
Килпис'ярви	KIL	69.02°	20.79°	65.80°	104.45°
Муонио	MUO	68.02°	23.53°	64.60°	105.82°
Пелло	PEL	66.90°	24.08°	63.49°	105.52°
Оулуярви	OUI	64.52°	27.23°	60.86°	106.60°
Хекеселви	HAN	62.30°	26.65°	58.60°	105.02°
Нурмиярви	NUR	60.50°	24.65°	56.79°	102.51°

### СОПОСТАВЛЕНИЕ НАБЛЮДЕННЫХ ДАННЫХ

На рис. 1 приведены магнитограммы  $X'$ -компоненты станций северного и южного полушарий в отклонении от спокойного уровня в 00.00–24.00 UT за 8 апреля 1995 г. в порядке убывания исправленной геомагнитной широты от  $\Phi \approx 82^\circ$  до  $\Phi \approx 57^\circ$ . Названия южных станций заключены в кружок. Приведены также вариации ежечасных  $Dst$  и 15-минутных  $PC$ -индексов. Индекс магнитной активности  $PC$  характеризует в баллах интенсивность магнитных возмущений в полярной шапке и тесно коррелирует с традиционно используемым индексом авроральных электроструй  $AE$ . Этот день приходится на фазу восстановления магнитной бури при  $Dst \approx -70$  нТл (в максимуме бури 7 апреля  $Dst \approx -149$  нТл). Видно, что появление суббурь в 12.00–13.00 UT, 15.00–16.00 UT и 20.00–21.00 UT, которое прослеживается на всей цепочке станций, находит отражение в индексе  $PC$ . Из магнитограмм следует, что характер вариаций в обоих полушариях во время суббурь очень схож.

Широтные разрезы интенсивности геомагнитных вариаций приведены на рис. 2. Сплошная линия соответствует компоненте  $X'$ , а штриховая –  $Z$ . Три верхних разреза приходятся на ранние вечерние часы (~15.00–16.00 MLT), когда над авроральными широтами на меридиане станций течет вос-

точная электроструя ( $X' > 0$ ). К полюсу от восточной электроструи располагается западный ток ( $X' < 0$ ). Переход от восточного к западному току (разрыв Харанга) в северном полушарии происходит на  $70^\circ < \Phi < 72^\circ$ . В южном полушарии эти широты сопряжены с океаном, где наблюдения отсутствуют. Но на широтах  $77^\circ < \Phi < 82^\circ$  видно хорошее согласие между вариациями магнитного поля в северном и южном полушариях не только по характеру, но и по интенсивности. Западный ток в эти часы охватывает широты к полюсу от  $\Phi \sim 82^\circ$ .

Восточная электроструя и сопровождающий ее высокоширотный западный ток с явно выраженной структурой электроструи в 15.20 UT сменяется преимущественно западным током во всем интервале широт с максимальной интенсивностью на  $\Phi \approx 73^\circ$  в 15.46 UT. Для возмущения в околополуденные часы MLT максимум тока в электроструе располагается на  $\Phi \approx 66^\circ$  и при незначительных по интенсивности возмущениях на  $\Phi > 72^\circ$ . Магнитные возмущения в северном и южном полушариях практически идентичны.

Магнитная буря 2 декабря 1993 г. началась в 18.00 UT. На рис. 3 приведены вариации  $X'$ -компоненты на рассматриваемой цепочке обсерваторий,  $PC$ -индексы магнитной активности,  $Dst$ -вариация. После 18.00 UT резко возрастает магнитная возмущенность в высоких широтах, растет  $|Dst|$ .

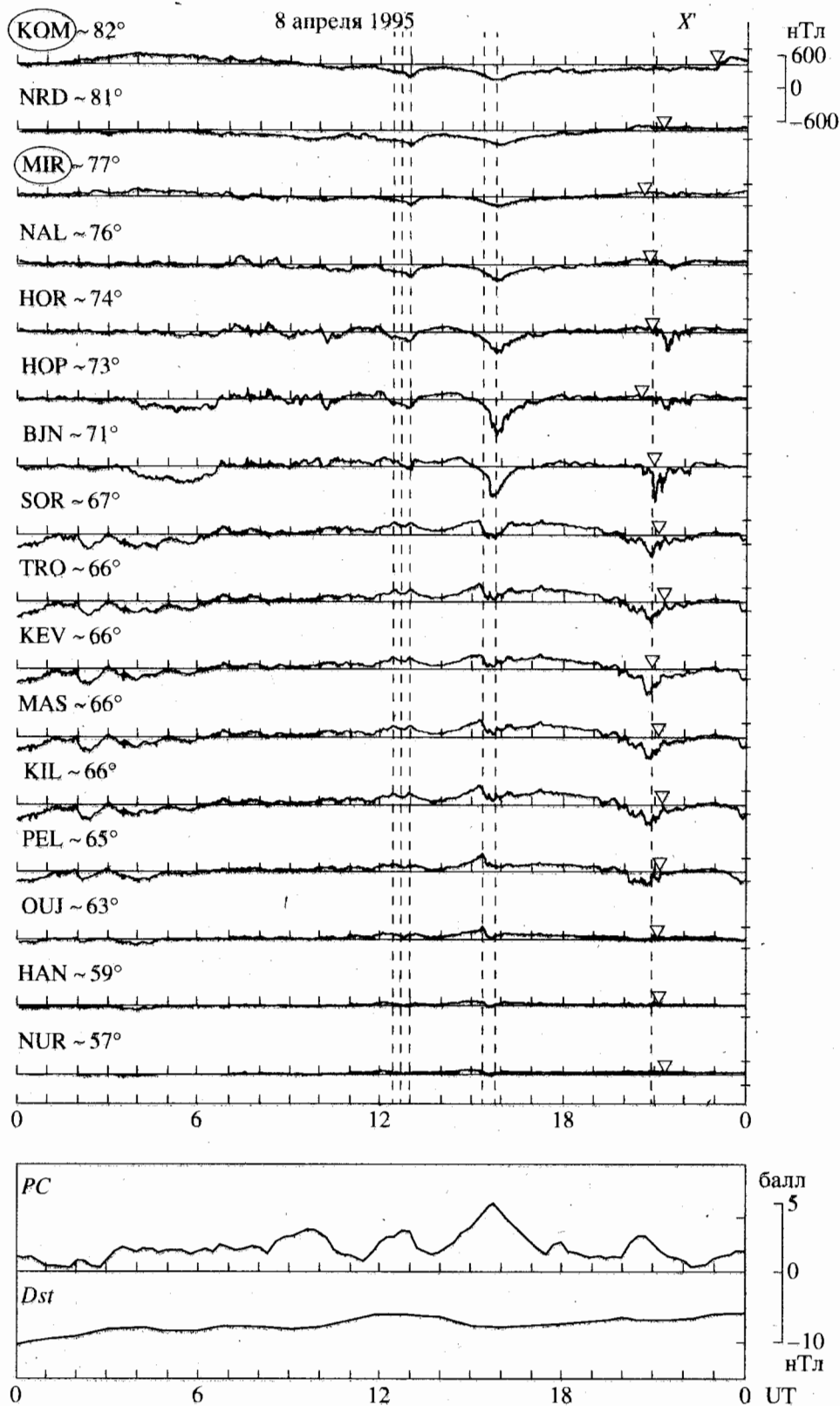
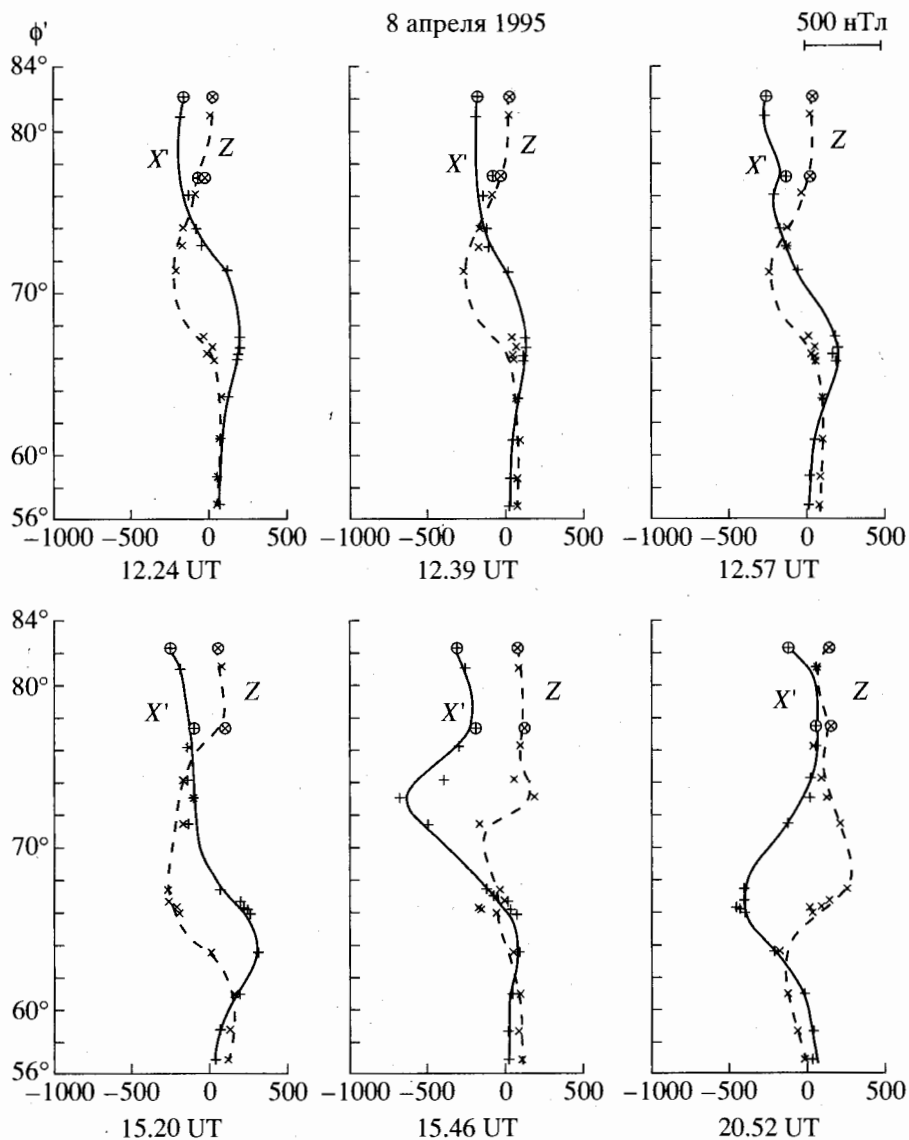


Рис. 1. Вариации  $X'$ -компоненты геомагнитного поля 8 апреля 1995 г. на меридиональной цепочке северного полушария (см. таблицу координат магнитных обсерваторий) и антарктических станций Мирный и Комсомольская. Вертикальные штриховые линии – моменты широтных разрезов, для которых проводились количественные сопоставления вариаций в двух полушариях, треугольники – местная геомагнитная полночь. Внизу индексы  $PC$  и  $Dst$  магнитных возмущений.



**Рис. 2.** Вариации  $X'$  (сплошная линия) и  $Z$  (штриховая линия) в зависимости от исправленной геомагнитной широты в интервалах существования восточной и западной электроструй на меридиональных цепочках 8 апреля 1995 г. для различных моментов времени. В кружки заключены данные южных станций.

Однако и до начала магнитной бури обсерватории цепочки фиксируют существование достаточно интенсивных магнитных возмущений. Их широтные разрезы, моменты которых отмечены вертикальными штриховыми линиями, приведены на рис. 4. До начала магнитной бури характерное широтное распределение в вечерние часы с восточным током на широтах авроральной зоны и западным током в более высоких широтах сохраняется до поздних вечерних часов. Интенсивность западного тока практически идентична в северном и южном полушариях (разрезы в 13.37 UT и 15.48 UT).

Начало магнитной бури совпадает с резким возрастанием магнитной активности в аврораль-

ной зоне и в полярной шапке. Резкое понижение  $X'$ -компоненты в  $\sim 18.00$  UT регистрируется на всех широтах экваториальной станции Сороя ( $\Phi' = 67.21^\circ$ ), а затем прослеживается на всех более высокоширотных обсерваториях с характерным временным запаздыванием по мере продвижения к полюсу. В 18.17 UT максимальная интенсивность западной электроструи зарегистрирована на  $\Phi' \approx 75^\circ$  (Нью-Алесунд), а в 18.25 UT — уже на  $\Phi' \approx 81^\circ$  (Норд). Вариации на обсерватории Мирный хорошо укладываются как во временные изменения, так и в широтные распределения, что можно интерпретировать как идентичность процесса смещения к полюсу наиболее активного участка западной электроструи по мере протекания суббури в обоих полушариях. Широтные разрезы

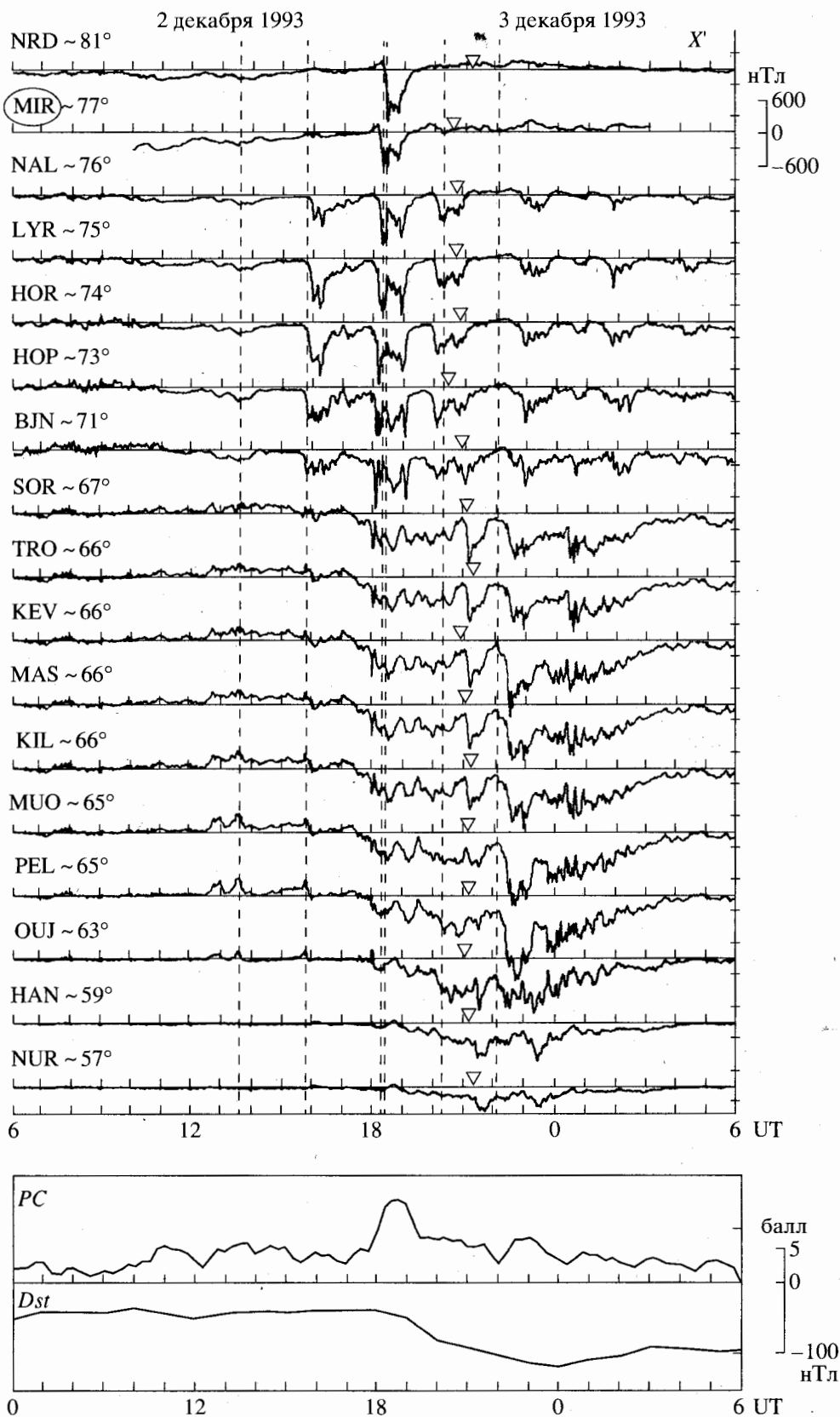


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но для 2-3 декабря 1993 г.

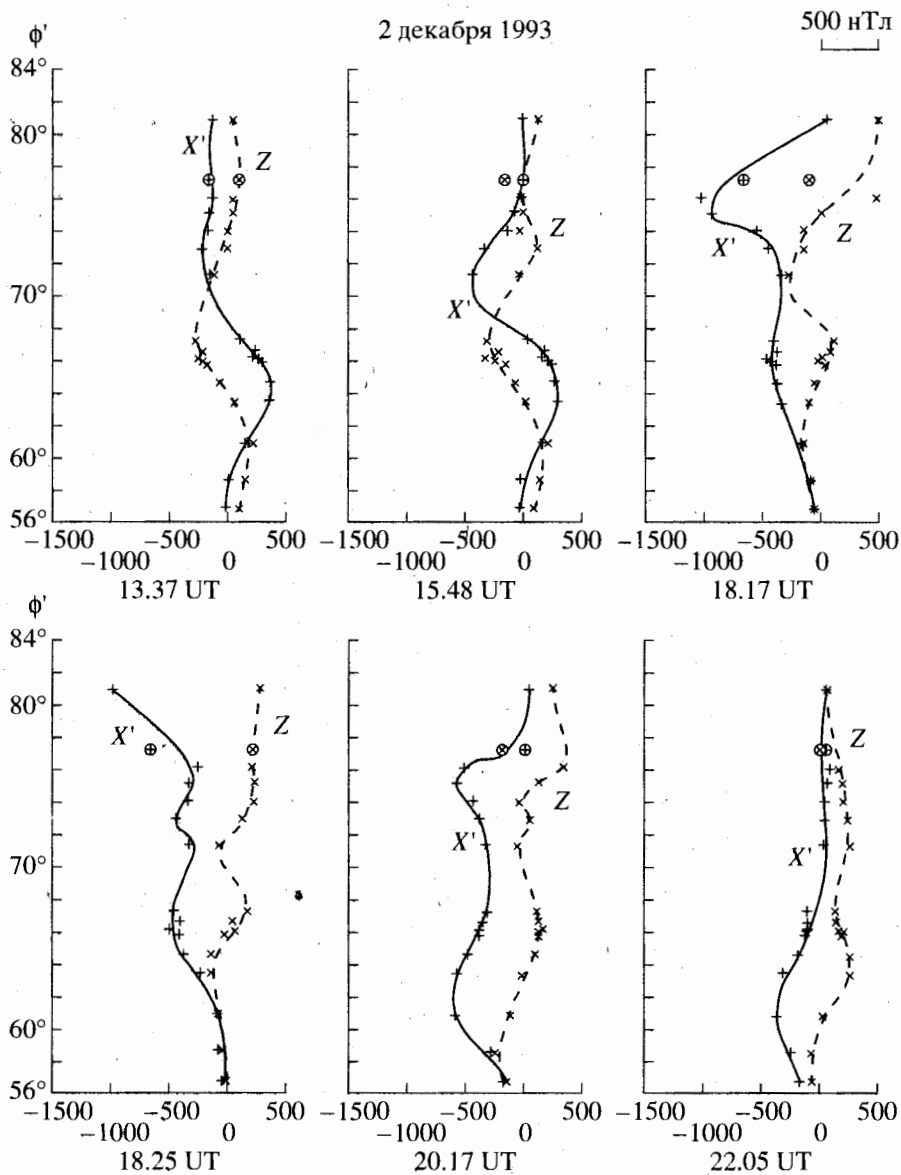


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но для 2–3 декабря 1993 г.

указывают на немонотонность изменения интенсивности тока в западной электроструе.

Аналогичное временное запаздывание максимума возмущенности с увеличением широты происходит и для экстремума  $X'$  в  $\sim 20.00$  UT. Однако это возмущение не захватывает широты  $\Phi' > 77^\circ$ , “останавливаясь” на  $\Phi' \approx 75^\circ$ . Широтный разрез в 20.17 UT иллюстрирует это обстоятельство.

Изменение с широтой интенсивности западного тока в интервалы между суббурями вблизи главной фазы магнитной бури видно на примере разреза в 22.05 UT. Максимум тока сместился на  $\Phi' \approx 61^\circ$  при  $Dst = -102$  нТл. На  $\Phi' > 70^\circ$  токи практически отсутствуют как в северном, так и в южном полушарии. Характер широтных распре-

лений интенсивности магнитных возмущений для суббурь в моменты экстремумов и в спокойные интервалы между суббурями во время магнитных бурь аналогичны описанным в [1].

## ОБСУЖДЕНИЕ

Изложенные выше результаты о характере протекания и интенсивности магнитных возмущений в двух полушариях сводятся к следующему:

- 1) суббури на фазе восстановления магнитной бури протекают практически идентично в северном и южном полушариях;
- 2) интенсивности магнитных возмущений примерно одинаковы на широтах  $77^\circ < \Phi' < 82^\circ$  как

для западного тока в раннем вечернем секторе к полюсу от разрыва Харанга, так и для западного тока в околополуденном секторе, охватывающего весь авроральный овал;

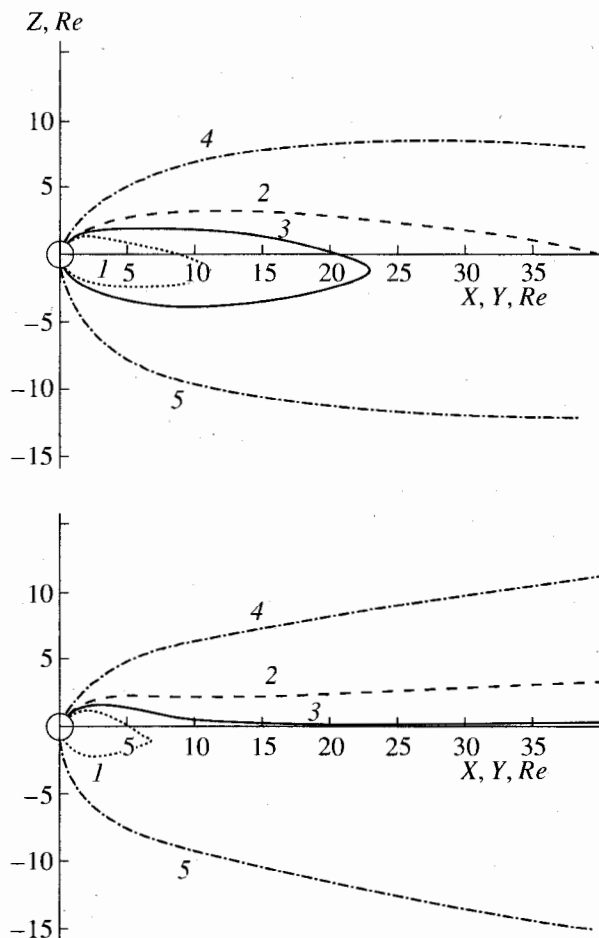
3) в период суббури, протекающих на фоне магнитной бури, происходит идентичное в двух полушариях распространение в более высокие широты из авроральной зоны максимума интенсивности западной электроструи. Соплосуются в двух полушариях также и интенсивности западных токов;

4) наблюдаемый момент максимума интенсивности западной электроструи в южном полушарии согласуется в увеличении широты в северном полушарии.

Эти результаты могли бы служить аргументом в пользу представления о замкнутости магнитных силовых линий геомагнитного поля на очень высоких геомагнитных широтах в период возмущений. Подобие в протекании вариаций магнитного поля и тесная связь их интенсивностей в двух полушариях на геомагнитных широтах  $77^{\circ}$ – $82^{\circ}$  является аргументом в пользу замкнутости магнитных силовых линий на таких высоких широтах. Рост интенсивности тока западного направления на столь высоких широтах зачастую запаздывает во времени относительно максимума развития суббури на широтах авроральной зоны. Так как магнитные силовые линии на авроральных широтах определенно замкнуты, то распространение возмущения к полюсу и подобный характер вариаций магнитного поля в двух полушариях можно трактовать как пересоединение предварительно разомкнутых хвостовых магнитных силовых линий. В такой интерпретации силовые линии магнитного поля, опирающиеся на широты станции Мирный, предполагаются замыкающимися по мере развития суббури. Следует отметить, что в [10] предложена модель плазменного слоя в хвосте магнитосферы, в которой примыкающая к овалу полярных сияний часть полярной шапки располагается на замкнутых магнитных силовых линиях. Согласно этой модели, полярная шапка, т.е. область с отсутствием авроральных вторжений, может существовать, даже если все ее магнитные силовые линии пересекают плазменный слой, т.е. являются замкнутыми.

Целесообразно обратиться к результатам моделирования с помощью существующих моделей внешнего магнитного поля для решения вопроса относительно характера магнитных силовых линий, опирающихся на авроральные электроструи. Были выбраны две современные модели внешнего геомагнитного поля: традиционная модель Цыганенко в ее последнем варианте [11] и параболическая модель [12].

На рис. 5 приведены результаты такого моделирования. Для 6 февраля 1994 г. из разреза за



**Рис. 5.** Проектирование экваториальной (1) и приполюсной (2) границ западной электроструи и ее центра (3) в магнитосферу по модели Цыганенко (вверху) и Алексеева и др. (внизу). Параметры электроструи определены из широтного разреза в 21.26 UT 6 февраля 1994 г. Магнитные силовые линии, пересекающие  $\Phi' = 77^{\circ}$ , обозначены (4) – для северного, (5) – для южного полушария.

21.26 UT получены геомагнитные широты экваториальной (1), приполюсной (2) границ западной электроструи и ее центра (3). Входными параметрами моделей являются: динамическое давление солнечного ветра, индекс  $Dst$ ,  $B_y$ - и  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля, угол наклона земного диполя  $\psi$  – для модели Цыганенко; расстояние от Земли до подсолнечной точки в магнитосфере  $R_1$ , зависящее от динамического давления солнечного ветра, расстояние от Земли до внутренней кромки токового слоя в хвосте магнитосферы  $R_2$  и магнитный поток  $\Phi_{\infty}$  в долях хвоста магнитосферы, для вычисления которых привлекались данные о вторжениях авроральной плазмы со спутников DMSP, угол наклона диполя  $\psi$  – для модели Алексеева. Магнитные силовые линии, опирающиеся на западную электрострую, спроектированы в магнитосферу по модели

Цыганенко (вверху) и Алексеева и др. (внизу). Приполюсная граница западной электроструи в обеих моделях располагается на разомкнутых магнитных силовых линиях. Цифрами 4 и 5 на рис. 5 обозначены магнитные силовые линии, пересекающие магнитную полночь на  $\Phi' = 77^\circ$  в северном и южном полушариях соответственно. По-видимому, необходимы дальнейшие уточнения использованных моделей для выяснения структуры геомагнитного поля и характера магнитных силовых линий в столь высоких широтах. В частности, характер модельных магнитных силовых линий может претерпеть радикальные изменения, если учесть магнитное поле токового флима, возникающее в ночной магнитосфере на фазе развития суббури.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сопоставлены вариации геомагнитного поля в высоких широтах двух полушарий во время суббурь в периоды магнитных бурь. Характер вариаций в южном полушарии на  $\Phi' \approx 77^\circ$  (Мирный) и  $\Phi' \approx 80^\circ$  (Комсомольская) подобен вариациям в северном полушарии.

2. Интенсивности возмущений, обусловленных токами западных электроструй, хорошо согласуются в двух полушариях.

3. Согласие между характером и интенсивностью магнитных возмущений в двух полушариях следует интерпретировать как возможную замкнутость магнитных силовых линий в столь высоких широтах. В пользу замкнутости магнитных силовых линий может свидетельствовать то, что возмущения распространяются с широт авроральной зоны, где силовые линии заведомо замкнуты. Однако моделирование с использованием современных моделей магнитного поля от внешних источников не дает замкнутости таких силовых линий. Это свидетельствует о том, что необходимо уточнение существующих моделей, описывающих магнитное поле на больших геоцентрических расстояниях в ночной магнитосфере.

Благодарим В.О. Папिताшвили за предоставление данных станций Комсомольская и Мирный, Датский Метеорологический институт – станции

Норд, О.А. Трошичева – магнитограмм станции Мирный. Мы благодарны Г. Луру за плодотворные дискуссии. Данные цепочки магнитометров, используемые в работе, получены в совместном проекте Германии–Финляндии–Норвегии–Польши, которым руководит Технический Университет Брауншвейга.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Feldstein Ya.I., Grafe A., Gromova L.I., Popov V.A.* Auroral electrojets during magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 14223.
2. *Craven J.D., Murphree J.S., Frank L.A., Cogger L.L.* Simultaneous optical observations of transpolar arcs in the two polar caps with DE 1 and Viking // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. P. 2297.
3. *Зверев В.П., Старков Г.В., Воробьев В.Г. и др.* Одновременные наблюдения полярных сияний в северной и южной полярных шапках // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1992. Т. 32. № 5. С. 62.
4. *Meng C.-I.* Polar cap arcs and the plasma sheet // *Geophys. Res. Lett.* 1981. V. 8. P. 273.
5. *Makita K., Meng C.-I., Akasofu S.-I.* Transpolar auroras, their particle precipitations, and the IMF By component // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 14085.
6. *Mizera P.F., Gorney D.J., Evans D.S.* On the conjugacy of the aurora: high and low latitudes // *Geophys. Res. Lett.* 1987. V. 14. P. 190.
7. *Obara T., Kitayama M., Mukai T. et al.* Simultaneous observations of sunaligned polar cap arcs in both hemispheres by EXOS-C and Viking // *Geophys. Res. Lett.* 1988. V. 15. P. 713.
8. *Huang C.Y., Craven J.D., Frank L.A.* Simultaneous observations of a theta aurora and associated magnetotail plasmas // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 10137.
9. *Gussenhoven M.S., Hardy D.A., Rich F.J.* Evidence that polar arcs occur on open field lines // *J. Geomag. Geoelectr.* 1990. V. 42. P. 737.
10. *Voronov E.V., Feldman S.V.* The auroral oval polar boundary position // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993. V. 59. P. 231.
11. *Tsyganenko N.A.* Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 5599.
12. *Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., Feldstein Ya.I.* Magnetic storms and magnetotail currents // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 7737.