

УДК 550.388.8

## СРЕДНЕШИРОТНЫЕ СИЯНИЯ НА ЮГЕ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ВО ВРЕМЯ БОЛЬШИХ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ 29–31 ОКТЯБРЯ И 20–21 НОЯБРЯ 2003 г.

© 2004 г. А. В. Михалев, А. Б. Белецкий, Н. В. Костылева, М. А. Черниговская

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск*  
*e-mail: mikhalev@iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 23.03.2004 г.

Анализируются предварительные результаты оптических наблюдений среднеширотных сияний в геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН на юге Восточной Сибири ( $52^\circ$  N,  $103^\circ$  E) в период двух больших магнитных бурь 29–31.X и 20–21.XI.2003 г. Результаты наблюдений сопоставляются с аналогичными данными среднеширотных сияний, наблюдававшихся в геофизической обсерватории в предшествующие годы. Зарегистрированные максимальные интенсивности атмосферных эмиссий и сопутствующая гелио-геофизическая обстановка позволяют сделать вывод, что анализируемые среднеширотные сияния по оптическому проявлению могут быть отнесены к экстремально наблюдававшимся в средних широтах.

### ВВЕДЕНИЕ

Статистика инструментальных наблюдений среднеширотных сияний (СС) при больших уровнях геомагнитных возмущений ( $D_{st} \leq -350-400$  нТл) ограничена и исчисляется единицами [1]. В силу этого некоторые особенности наблюдаемых среднеширотных форм сияний остаются предметом исследований ряда работ [2, 3]. Одной из целей этих исследований может быть аналог хорошо разработанной и широко используемой для высоких широт концепции аврорального овала, в которой полярные сияния являются средством надежной и точной локализации положения вторжения в атмосферу потоков энергии частиц из магнитосферы Земли.

В настоящей работе представлены предварительные результаты оптических наблюдений СС во время двух больших геомагнитных бурь 29–31.X и 20–21.XI.2003 г. в геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН на юге Восточной Сибири ( $52^\circ$  N,  $103^\circ$  E).

### АППАРАТУРА И УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Измерения оптического излучения верхней атмосферы проводились с помощью зенитных фотометров с интерференционными качающимися светофильтрами ( $\Delta\lambda_{1/2} \sim 1-2$  нм) в линиях излучения 558 и 630 нм. Также регистрировалось излучение в ближней инфракрасной (720–830 нм) и ультрафиолетовой (360–410 нм) областях спектра. Спектральные диапазоны 360–410 и 720–830 нм выделялись абсорбционными светофильтрами. Угловые поля зрения каналов фотометра составляли  $4-5^\circ$ . Абсолютная калибровка измеритель-

ных трактов аппаратуры осуществлялась ранее по эталонным звездам и контролировалась с помощью опорных световых источников в вечерние и утренние часы наблюдений. Программное обеспечение фотометра позволяло записывать данные фотометрических каналов с усреднением  $\sim 12$  с. При появлении импульсных сигналов, превышающих заданный порог, имелась возможность записывать сигналы с временным разрешением  $\sim 8$  мс.

Оптические наблюдения 29–31.X.2003 г. проводились в условиях сплошной облачности. Это обстоятельство могло привести к двум эффектам. Во-первых, из-за поглощения облачностью регистрируемые у поверхности Земли светимости атмосферных эмиссий должны иметь значения ниже светимостей на высотах высвечивания этих эмиссий и, соответственно, ниже регистрируемых светимостей в условиях возможной ясной погоды в эти интервалы наблюдений. Во-вторых, из-за рассеяния излучения облачностью на большие углы эффективное поле зрения каналов фотометра могло иметь существенно большие величины. Это могло привести к регистрации излучения с более высокоширотных областей относительно места локализации станции наблюдения ( $\geq 1-2^\circ$  широты). Реальный учет поглощения облачностью от протяженного источника атмосферного излучения представляет собой довольно сложную задачу, зависящую от многих факторов. Поэтому на предварительном этапе для оценки величины поглощения облачностью и возможности приведения зарегистрированных интенсивностей свечения атмосферных эмиссий 29 и 30.X.2003 г. к условиям ясного неба и последующего их сопо-

ставления с другими среднеширотными сияниями была проведена оценка типичного поглощения излучения облачностью. Были выбраны 4 ночи, соответствующие этому же сезону, с быстрой (не более 40 мин) сменой метеорологической обстановки (ясно–облачно). Для этих ночей было осуществлено сопоставление регистрируемых интенсивностей в атмосферных эмиссиях 558 и 630 нм для ясных и облачных интервалов наблюдений и соответственно определены коэффициенты поглощения облачностью. Полученные таким образом коэффициенты поглощения составили следующие минимальные, максимальные и средние значения, соответственно, для эмиссии 558 нм – 1.57, 2.6 и 1.92; для эмиссии 630 нм – 1.5, 2.46 и 1.85. Оценочные коэффициенты поглощения облачностью использовались далее для приведения зарегистрированных значений интенсивностей в условиях облачности к условиям, соответствующих ясному небу.

Оптические наблюдения 19–23.XI.2003 г. проводились в условиях ясного неба.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН среднеширотные сияния были зарегистрированы 29, 30.X и 20.XI.2003 г. Среднеширотным сияниям 29 и 30.X.2003 г. предшествовали две сильнейших солнечных вспышек класса X17.2 и X10.0, соответственно, 28 и 29.X.2003 г. Указанные вспышки относятся к наиболее мощным солнечным вспышкам, зарегистрированным с 1976 г. (<http://www.spaceweather.com/solarflares/top-flares.html>), которые послужили источником двух последовательных больших геомагнитных бурь 29 и 30.X.2003 г. с минимальными значениями  $D_{st}^{\min}$  индекса, соответственно, -345 и -401 нТл и максимальным  $K_p$  индексом 9<sub>0</sub>.

Среднеширотному сиянию 20.XI.2003 г. предшествовала серия солнечных вспышек 17–18.XI класса M, которая послужила источником сильнейшей в этом цикле солнечной активности магнитной бури с  $D_{st}^{\min} = -465$  нТл и  $K_p = 9$ .

На рис. 1а, б представлены распределения  $D_{st}$  и  $K_p$  индексов и общий вид поведения атмосферной эмиссии 630 нм в геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН для этих магнитных бурь. На рис. 2 и 3 представлено более детально поведение зенитных интенсивностей атмосферных эмиссий 558 и 630 нм для ночи 30.X и 20.XI.2003 г., когда отмечались наибольшие возмущения в регистрируемых эмиссиях. Для 20.XI также приведено поведение оптического потока в спектральной полосе 360–410 нм.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Для всех трех описываемых СС начало роста интенсивности эмиссии 630 нм ( $J_{630}$ ) и максимальных значений  $J_{630}$  соответствует главным фазам магнитных бурь. Среднеширотное сияние 20.XI захватывает начало фазы восстановления. Доминирующей эмиссией СС 29 и 30.X.2003 г. является эмиссия 630 нм. Небольшие вариации эмиссии 558 нм и световых потоков в спектральных каналах 360–410 нм и 720–830 нм отмечаются в интервалы времени резких увеличений интенсивности эмиссии 630 нм. В среднеширотном сиянии 20.XI второй доминирующей эмиссией является эмиссия 558 нм, возмущения которой оказываются сдвинуты по времени относительно возмущений эмиссии 630 нм. Вариации в спектральных каналах 360–410 нм и 720–830 нм в большей степени повторяют вариации эмиссии 558 нм.

Максимальные значения  $J_{630}$  для рассматриваемых среднеширотных сияний отмечаются во вторую половину ночи. Эта особенность регистрации СС в периоды главных фаз магнитных бурь в геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН уже отмечалась в работах [4, 5]. Во многих работах в качестве геомагнитного индекса, наиболее тесно коррелирующего с интенсивностью эмиссии 630 нм при геомагнитных возмущениях, указывают  $D_{st}$ -индекс в сочетании с другими индексами солнечной и геомагнитной активности [6, 7]. Поэтому наблюдаемая особенность регистрации СС в работах [4, 5] связывалась с выраженной зависимостью от времени  $D_{st}$ -индекса вариаций геомагнитного поля во время геомагнитных возмущений.

В таблице приведены максимальные значения  $K_p$ -индекса ( $K_p^{\max}$ ),  $A_p$ -индексы, минимальные значения  $D_{st}$ -индекса ( $D_{st}^{\min}$ ) в течение бури и максимальные значения зенитных интенсивностей эмиссий 558 и 630 нм ( $J_{558 \text{ нм}}^{\max}$  и  $J_{630 \text{ нм}}^{\max}$ ) во время СС, зарегистрированных в геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в последние годы. Для СС 29 и 30.X.2003 г. в колонке интенсивностей эмиссий 630 нм кроме зарегистрированных значений в скобках приведены вероятностные значения интенсивностей, приведенные к условиям ясного неба, оцененные описанным выше методом.

Результаты таблицы позволяют сделать два вывода. Во-первых, зарегистрированные максимальные интенсивности эмиссий 630 нм во время СС 30.X и 20.XI.2003 г. имеют наибольшие значения за весь период проведения оптических наблюдений в геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (1989–1993 и 1997–2003 гг.). Это относится и к возмущению эмиссии 558 нм, зарегистрированному во время СС 20.XI.2003 г. Во-вторых, максимально регистрируемые значения интенсивности

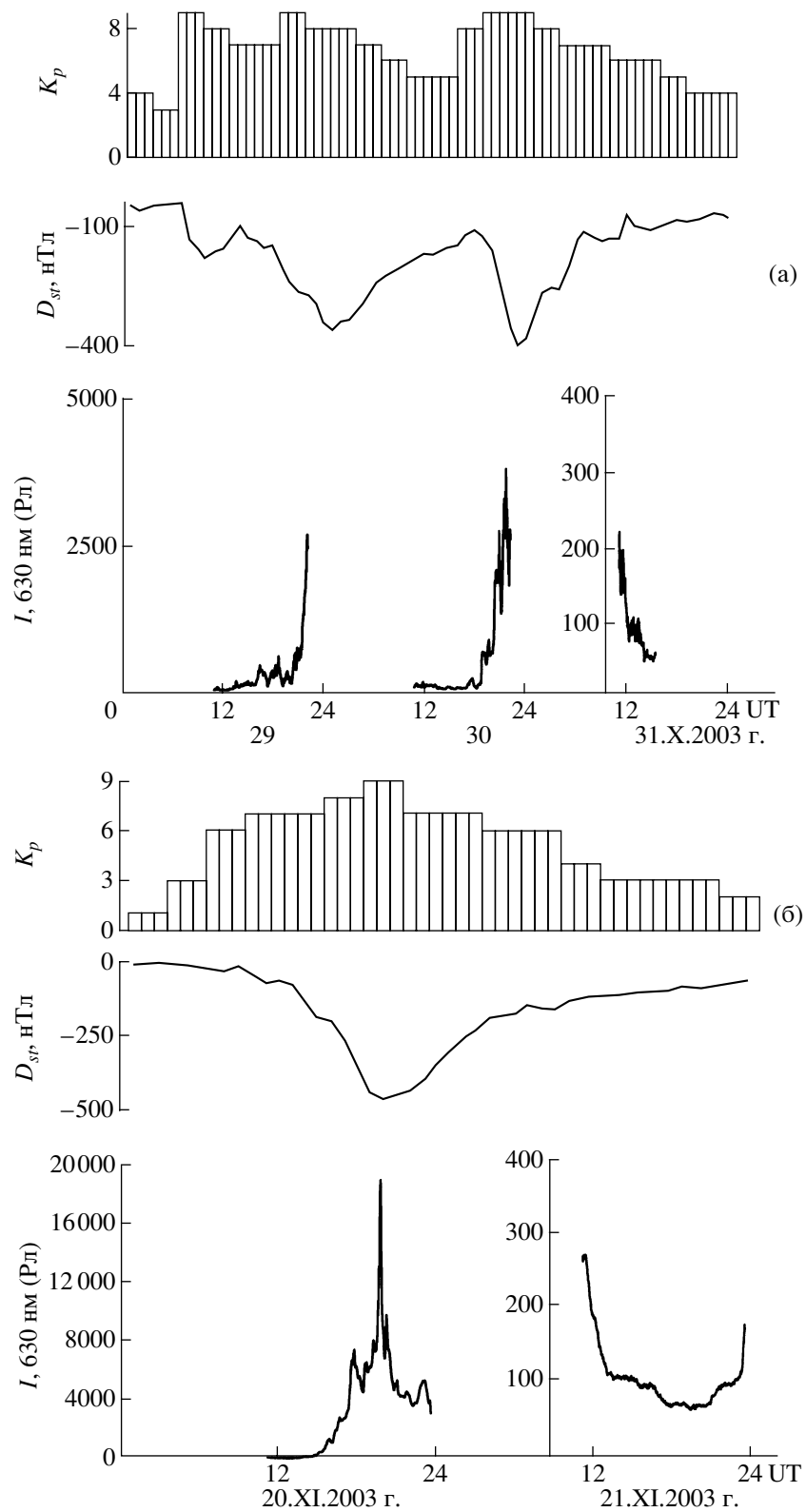


Рис. 1.

в большей степени коррелируют с  $D_{st}$ , чем с  $K_p$ -индексом. Последнее может также иллюстрировать рис. 4, где приведена зависимость прираще-

ния интенсивности эмиссии 630 нм от максимальных значений  $D_{st}$ -индекса для геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН для различных

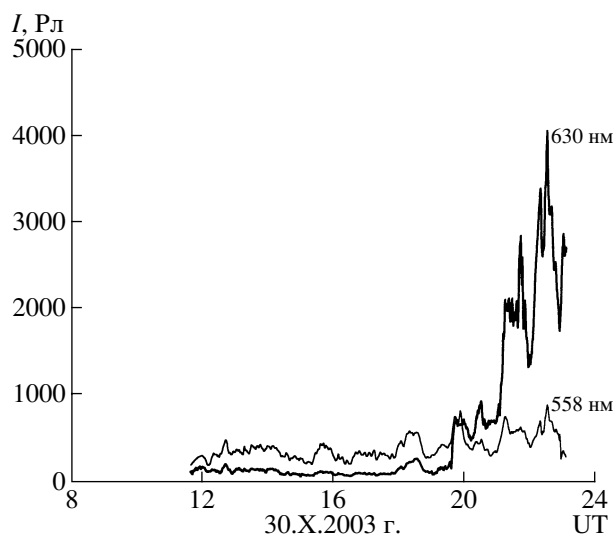


Рис. 2.

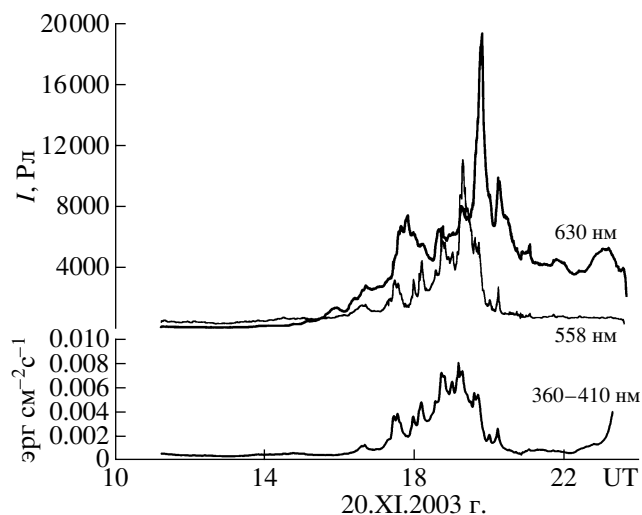


Рис. 3.

уровней геомагнитно возмущенных дней (экспериментальные точки и линейная аппроксимация, прямая 1). На этом же рисунке штриховой линией (2) для сравнения приведена зависимость эмиссии 630 Нм от одновременных индексов  $D_{st}$  из работы [6] для обсерватории Верхний Прованс.

Согласно [2], основные типы среднеширотных сияний с доминирующей эмиссией 630 нм проецируются в область плазмоспаузы. Широтное местоположение станции наблюдения определяет возможность последовательной регистрации среднеширотных и субавроральных ионосферных структур и их оптических проявлений с ростом магнитной активности. При достаточно сильных геомагнитных возмущениях это, в первую очередь, должно приводить к переходу от области

среднеширотного свечения атмосферы к области диффузного свечения, расположенной экваториальнее аврорального овала и охватывающей пространственные размеры  $3-5^\circ$  широты и более [12]. При этом, согласно [13], могут выделяться более “тонкие” плазменные границы на высотах верхней атмосферы и их естественные проекции в магнитосферу: свечение ночного неба – плазмосфера, экваториальная граница слабой диффузной авроральной эмиссии – плазмоспауза, диффузная авроральная зона – остаточный плазменный слой и район кольцевого тока. В этом случае зависимость  $J_{630}$  от  $D_{st}$ -индекса во время геомагнитных бурь имеет физическую интерпретацию, связанную с взаимодействием усиливающего кольцевого тока (который и определяет  $D_{st}$ -вариации)

Таблица

Дата	Тип бури	$K_p^{\max}$	$A_p$	$D_{st}^{\min}$ , нТл	$J_{630 \text{ нм}}^{\max}$ , кРл	$J_{558 \text{ нм}}^{\max}$ , кРл	Фаза бури
24.III.1991	G4	9-	161	-281	~2.6		Гл
25.III.1991	G4	9-	130	-298	~0.6		Вс
3.II.1992	G4	8-	92	-170	~0.3		Вс
6.IV.2000	G4	8+	82	-287	~2.77		Гл
7.IV.2000	G4	9-	74	-288	~0.24		Вс
31.III.2001	G4	9-	192	-358	~3.1	~1.5	Вс
21.X.2001	G4	8-	57	-166	~0.57		Гл
22.X.2001	G4	7+	96	-166	~0.67		Вс
29.X.2003	G4	9-	204	-345	$\geq 2.9$ (4.3-7.1)		Гл
30.X.2003	G5	9 <sub>0</sub>	191	-401	$\geq 4.3$ (6.4-10.5)		Гл
20.XI.2003	G4	9-	150	-429	~19.4	~11.1	Гл

Обозначения: Гл – главная фаза магнитной бури, Вс – фаза восстановления магнитной бури.

с плазмосферой, результатом которого могут быть усиления потоков плазмы из плазмосферы в ионосферу (F2-область) и ее нагрев.

Таким образом, величина  $D_{st}^{\min}$  при других равных магнито-ионосферных условиях, может служить параметром, позволяющим сопоставлять регистрируемые или ожидаемые  $J_{630}$  в периоды СС в конкретной широтно-долготной зоне при различных магнитных бурях. В отношении магнитной бури 20.XI, с минимальным значением  $D_{st}^{\min} = -465$  нТл, можно заметить, что в период 1957–2003 гг. только одна магнитная буря (13–14.III.1989 г.) имела меньшие значения  $D_{st}^{\min}$ . Геомагнитная буря 11.II.1958 г., которая сопровождалась знаменитым планетарным среднеширотным сиянием, имела минимальное значение  $D_{st}$ -индекса  $-426$  нТл.

Вызывает определенный интерес появление в спектре СС 20.XI.2003 г. интенсивной эмиссии 558 нм, величина которой в максимуме возмущения превысила значения 11 кРл. Ранее нами уже сообщалось о регистрации в средних широтах возмущения этой эмиссии (до значений  $\sim 1.5$  кРл) в период суббуревых возмущений во время большой магнитной бури 31.III.2001 г. [8, 9]. В работах [8, 9] возмущения эмиссии 558 нм связывалось с высыпанием электронов авроральных энергий.

Следует отметить, что в работе [2], где предлагается классификация наблюдаемых типов среднеширотных сияний, эмиссия 558 нм не указывается в качестве доминирующей эмиссии ни в одном из обсуждаемых типов среднеширотных сияний. Вероятно, такие возмущения эмиссии 558 нм в средних широтах характерны только для интенсивных магнитных бурь, и статистика их наблюдений также ограничена. Авторам удалось обнаружить только одну работу, в которой описывается аналогичное возмущение эмиссии 558 нм в период магнитной бури в более низких широтах. Так в работе [10] в период интенсивной магнитной бури 21.X.1989 г. ( $K_p^{\max} = 8_+$ ,  $D_{st}^{\min} = -268$  нТл) в северной части небосвода на о. Хоккайдо ( $44^\circ$  N,  $142^\circ$  E) отмечалось интенсивное красное среднеширотное сияние. Интенсивность эмиссии 558 нм оставалась на обычном уровне, за исключением резкого всплеска в течение  $\sim 8$  мин. По мнению авторов [10], подобные сияния на таких низких широтах наблюдаются раз в 20 лет.

Возмущения в спектральном диапазоне 360–410 нм могут быть интерпретированы как появление эмиссии  $N_2^+$  (1NG) с длиной волны 319.4 нм, обычно наблюдаемой в полярных сияниях в результате ионизации высыпавшими электронами молекулярного азота. Здесь уместным будет отметить, что, согласно [12], в диффузном свечении

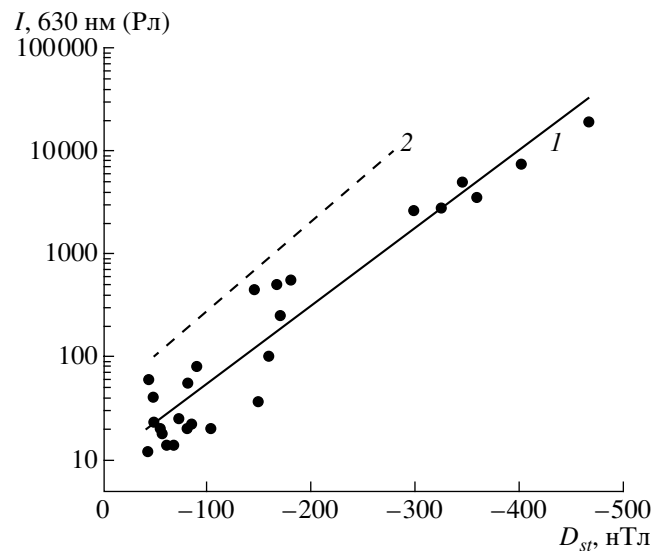


Рис. 4.

практически отсутствует свечение в полосе  $N_2^+$  (1NG), а интенсивность эмиссии 630 нм в 4 раза выше интенсивности эмиссии 558 нм, что указывает о мягкости спектра вторгающихся электронов в диффузном свечении. Во время СС 20.XI.2003 г. интенсивность эмиссии 558 нм в отдельный интервал времени превышала интенсивность эмиссии 630 нм, что косвенно может указывать, как и во время магнитной бури 31.III.2001 г. [8, 9], на высыпание электронов авроральных энергий. В этом случае наблюдаемое СС 20.XI обладает особенностями типичными для обычных полярных сияний.

Согласно [1], обычные полярные сияния не опускаются ниже широт, соответствующих  $L$ -оболочкам  $\sim 2.7$ . По данным NOAA (<http://www.sec.noaa.gov/Aurora/index/html>) экваториальная граница полярных сияний при максимальном уровне геомагнитных возмущений в азиатском регионе соответствует  $\sim 48^\circ$  исправленной геомагнитной широты. Исправленная геомагнитная широта  $47^\circ$  и соответствующая  $L$ -оболочка ( $L \sim 2$ ) станции наблюдения геофизической обсерватории указывают на более значительные смещения ионосферных и магнитосферных структур в период магнитной бури 20–21.XI.2003 г., возможно соответствующих предельному сжатию магнитосферы [1].

## ВЫВОДЫ

Таким образом, полученные результаты наблюдения СС во время магнитных бурь 29–31.X и 20–21.XI.2003 г., обсуждаемый возможный механизм формирования СС, связанный с величиной кольцевого тока, статистика магнитных бурь по  $D_{st}$ -индексу и особенности регистрируемого спек-

трального состава позволяют предположить, что СС 30.X и 20.XI.2003 г. могут быть отнесены к экстремально наблюдаемым как в месте локализации геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, так и в других среднеширотных зонах. Вероятно, что СС 20.XI.2003 г. может также дополнить список наиболее знаменитых сияний (Great aurora), обсуждение которых проводится в ряде работ [11].

Зарегистрированные характеристики СС 20.XI.2003 г. (в частности, интенсивности эмиссии 558 нм ~10 кРл, что соответствует классу II полярных сияний по международному коэффициенту яркости) формально позволяют отнести это сияние, по крайней мере, в отдельные интервалы времени к “обычным” формам полярных сияний.

Работа выполнялась при поддержке гранта РФФИ (№ 03-05-64744) и гранта № НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хорошева О.В.* Магнитосферные возмущения и связанная с ними динамика ионосферных электроструй, полярных сияний и плазмопаузы // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1987. Т. 27. № 5. С. 804–811.
2. *Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A. and Slater D.W.* Spectrometric and photometric observations of low-latitude aurorae // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № A5. P. 7695–7709.
3. *Shiokawa K., Ogawa T., Oya H. et al.* A stable auroral red arc observed over Japan after an interval of very weak solar wind // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № A13. P. 26091–26101.
4. *Михалев А.В.* Некоторые особенности наблюдений среднеширотных сияний и возмущений эмиссий верхней атмосферы во время магнитных бурь в регионе Восточной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2001. Т. 14. № 10. С. 970–973.
5. *Mikhalev A.V.* Hight behavior of the 630 nm emission in mid-latitude auroras during strong magnetic storms // *Solar-Terrestrial Magnetic Activity and Space Environment. COSPAR Colloquia Series*. 2002. Issue 14. P. 295–297.
6. *Трутце Ю.Л.* Верхняя атмосфера во время геомагнитных возмущений // *Полярные сияния и свечения ночного неба*. М.: Наука, 1973. № 20. С. 5–22.
7. *Rassoul H.K., Rochrbaugh R.P., Tinsley B.A.* Low-latitude particle precipitation and associated local magnetic disturbance // *J. Geophys. Res. A.* 1992. V. 97. № 4. P. 4041–4052.
8. *Горелый К.И., Карачиев В.Д., Иевенко И.Б. и др.* Одновременные оптические наблюдения большой магнитной бури 31 марта 2001 г. в Москве, Восточной Сибири и Якутии // *Солнечно-земная физика*. 2002. Вып. 2(115). С. 265–266.
9. *Дегтярев В.И., Михалев А.В. и Jiуао Ху.* Вариации свечения ночного неба в Восточной Сибири в период магнитной бури 31 марта – 4 апреля 2001 г. // *Оптика атмосферы и океана*. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 552–556.
10. *Miyoka Hiroshi, Hirasava Takeo, Yumoto Kiyuhumi, Tanaka Yoshit.* Low latitude aurora on October 21, 1989. I. // *Proc. Jap. Acad. B.* 1990. V. 66. № 3. P. 47–51.
11. *Vallance Jones A.* Historical review of great aurora // *Can. J. Phys.* 1992. V. 70. P. 479–487.
12. *Старков Г.В.* Планетарная динамика аврорального свечения // *Физика околоземного космического пространства*. Т. 1. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2000.
13. *Фельдштейн Я.И., Гальперин Ю.И.* Структура авроральных вторжений в ночном секторе магнитосферы // *Космич. исслед.* 1996. Т. 34. № 3. С. 227–247.