

А.В. Михалев, А.Б. Белецкий, Н.В. Костылева, М.А. Черниговская

Характеристики среднеширотных сияний во время больших геомагнитных бурь в текущем солнечном цикле

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 12.11.2004 г.

Приводятся характеристики наиболее интенсивных среднеширотных сияний в регионе Восточной Сибири (52° с.ш., 103° в.д.), наблюдавшихся в период больших геомагнитных бурь 6–7 апреля 2000 г., 31 марта 2001 г., 29–31 октября и 20–21 ноября 2003 г. В зависимости от уровня геомагнитной активности и фазы магнитной бури зарегистрированные среднеширотные сияния могут быть отнесены к различным типам среднеширотных сияний: «d» (с преобладанием эмиссии 630 нм), SAR-дугам (630 нм) и авроральному (558 и 630 нм) с проявлением суббуревой активности. Обсуждаются отмечаемая особенность преимущественного появления среднеширотных сияний в определенные часы суток (UT-зависимость) и связь с магнитоносферными структурами.

Введение

Статистика инструментальных наблюдений среднеширотных сияний (СС) при больших уровнях геомагнитных возмущений ($D_{st} \leq -300$ нТл) ограничена и исчисляется единицами [1]. В силу этого некоторые особенности наблюдаемых среднеширотных форм сияний по-прежнему остаются предметом исследований в работах последних лет [2, 3].

В данной статье представлены результаты оптических наблюдений СС во время больших геомагнитных бурь, наблюдаемых в текущем солнечном цикле на юге Восточной Сибири (52° с.ш., 103° в.д., Геофизическая обсерватория Института солнечно-земной физики СО РАН).

Аппаратура и методика 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 атомарного кислорода 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 свето-

фильтрами. Угловые поля зрения каналов фотометра составляли $4-5^\circ$. Абсолютная калибровка измерительных трактов аппаратуры осуществлялась 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 ~ 12 с. При появлении импульсных сигналов, превышающих заданный порог, имелась возможность записывать сигналы с временным разрешением ~ 8 мс.

Результаты наблюдений

Известно, что одной из доминирующих эмиссий в СС является эмиссия атомарного кислорода 630 нм. В зависимости от уровня геомагнитных возмущений, фазы магнитной бури и широты места наблюдения эта эмиссия может иметь особенности проявления в различных типах среднеширотных сияний [2]. В таблице приведены характеристики магнитных бурь, 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 (I_{558}^{\max} и I_{630}^{\max}) во время СС, зарегистрированных в геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в последние годы.

Дата	Тип бури	K_p^{\max}	A_p	D_{st}^{\min} , нТл	I_{630}^{\max} , кРЛ	I_{558}^{\max} , кРЛ	Фаза бури
24/03/1991		9 ₋	161	-281	~2,6		Гл
25/03/1991	G4	9 ₋	130	-298	~0,6		Вс
03/02/1992	G4	8 ₋	92	-170	~0,3		Вс
06/04/2000		8 ₊	82	-287	~2,77		Гл
07/04/2000	G4	9 ₋	74	-288	~0,5		Вс
31/03/2001	G4	9 ₋	192	-358	~3,1	~1,5	Вс
21/10/2001		8 ₋	57	-166	~0,57		Гл
22/10/2001	G4	7 ₊	96	-166	~0,67		Вс
29/10/2003	G4	9 ₋	204	-345	$\geq 2,9$ (4,3–7,1)		Гл
30/10/2003	G5	9 ₀	191	-401	$\geq 4,3$ (6,4–10,5)		Гл
20/11/2003	G4	9 ₋	150	-465	~19,4	~11,1	Гл

СС во время магнитных бурь 29 и 30 октября 2003 г. регистрировались в условиях сплошной облачности, поэтому в таблице в колонке максимальных интенсивностей эмиссии 630 нм в скобках дополнительно указаны интенсивности, приведенные к условиям ясного неба.

Из таблицы следует, что наиболее интенсивные СС в текущем солнечном цикле отмечались во время 4 магнитных бурь: 6–7 апреля 2000 г., 31 марта 2001 г., 29–30 октября и 20–21 ноября 2003 г.

Среднеширотное сияние во время магнитной бури 6–7 апреля 2000 г. Наибольшие значения интенсивности эмиссии 630 нм (I_{630}) отмечались в интервале времени 18–21 UT в период главной фазы магнитной бури [4]. Возмущения эмиссии 558 нм и в спектральном канале 360–410 нм выражены слабо и отмечались только в моменты наиболее интенсивного роста эмиссии 630 нм. Амплитуда возмущенной I_{630} 7 апреля 2000 г. в период фазы восстановления была существенно ниже и интерпретировалась как SAR-дуга [5].

Среднеширотное сияние во время магнитной бури 31 марта 2001 г. отмечалось в фазе восстановления. Главная фаза этой магнитной бури приходилась на светлое время суток в пункте наблюдения, в связи с чем отсутствуют данные оптических наблюдений для главной фазы этой бури. В работах [6, 7] возмущения эмиссии 630 нм в интервале времени 14:00–15:30 UT интерпретируются как интенсивная SAR-дуга. Возмущения атмосферных эмиссий в интервале 15:30–21:30 UT, коррелирующие с суббуревой активностью в высоких широтах, связываются с высыпанием высокоэнергичных авроральных электронов. Доминирующими эмиссиями в этот интервал времени (кроме эмиссии 630 нм) являются также эмиссия атомарного кислорода 558 нм и излучение в спектральной области 360–410 нм.

Среднеширотные сияния во время магнитных бурь 29–30 октября и 20–21 ноября 2003 г. соответствуют экстремальным геомагнитным возмущениям.

Среднеширотным сияниям 29 и 30 октября 2003 г. предшествовали две сильнейшие солнечные вспышки класса X17.2 и X10.0 соответственно 28 и 29 октября 2003 г. Указанные вспышки относятся к наиболее мощным солнечным вспышкам, зарегистрированным с 1976 г. (<http://www.spaceweather.com/solarflares/topflares.html>), которые послужили источником двух последовательных больших геомагнитных бурь 29 и 30 октября 2003 г. с минимальными значениями D_{st}^{min} -индекса, соответственно –345 и –401 нТл и максимальным K_p -индексом 9₀.

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

Для СС 29, 30 октября и 20 ноября 2003 г. начало роста интенсивности эмиссии 630 нм и максимальных значений I_{630} соответствует главным фазам магнитных бурь. Среднеширотное сияние 20 ноября 2003 г. захватывает начало фазы восстановления. Доминирующей эмиссией СС 29 и 30 октября

2003 г. является эмиссия 630 нм. Небольшие вариации эмиссии 558 нм и световых потоков в спектральных каналах 360–410 и 720–830 нм отмечаются в интервалы времени резких увеличений интенсивности эмиссии 630 нм. В среднеширотном сиянии 20 ноября 2003 г. второй доминирующей эмиссией является эмиссия 558 нм, возмущения которой оказываются сдвинуты по времени относительно возмущений эмиссии 630 нм. Вариации в спектральных каналах 360–410 и 720–830 нм в большей степени повторяют вариации эмиссии 558 нм.

Зарегистрированные максимальные интенсивности эмиссий 630 нм во время СС 30 октября и 20 ноября 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 ноября 2003 г.

Обсуждение

Рассматриваемые СС, которые наблюдались в главные фазы магнитных бурь 6 апреля 2000 г., 29–30 октября и 20 ноября 2003 г., обладают общей особенностью, связанной с их регистрацией во вторую половину ночи. На рис. 1 приведены кривые ночного хода атмосферной эмиссии 630 нм для этих дат.

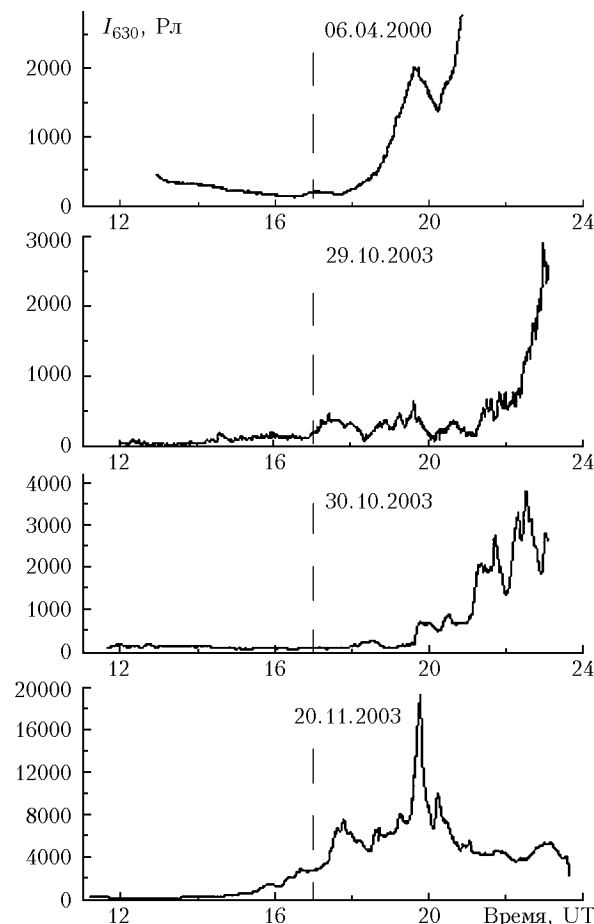


Рис. 1. Ночной ход атмосферной эмиссии 630 нм во время среднеширотных сияний в главной фазе магнитных бурь

Местная полночь соответствует 17 UT и отмечена вертикальной штриховой линией. Указанная особенность относится и к менее интенсивному СС 21 октября 2001 г. Особенность регистрации СС во вторую половину ночи в периоды главных фаз магнитных бурь в геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН уже отмечалась в работах [4, 8] и связывалась с корреляцией I_{630} с D_{st} -индексом вариаций геомагнитного поля во время геомагнитных возмущений и выраженной UT-зависимостью D_{st} -индекса. Зависимость I_{630} от D_{st} -индекса во время геомагнитных бурь имеет физическую интерпретацию, связанную с взаимодействием усиливающего кольцевого тока (который и определяет D_{st} -вариации) с плазмосферой, результатом которого могут быть усиление потоков плазмы из плазмосферы в ионосферу и ее нагрев.

Фазы восстановления магнитных бурь 7 апреля 2000 г. и 31 марта 2001 г. характеризуются другим видом кривой ночного хода эмиссии 630 нм, с преобладанием наиболее выраженных возмущений I_{630} в первую половину ночи. На рис. 2 приведены кривые ночного хода эмиссии 630 нм для 7 апреля 2000 г. и 31 марта 2001 г. Для сравнения приведена также кривая ночного хода этой эмиссии для 25 марта во время большой магнитной бури 24–25 марта 1991 г. предыдущего солнечного цикла.

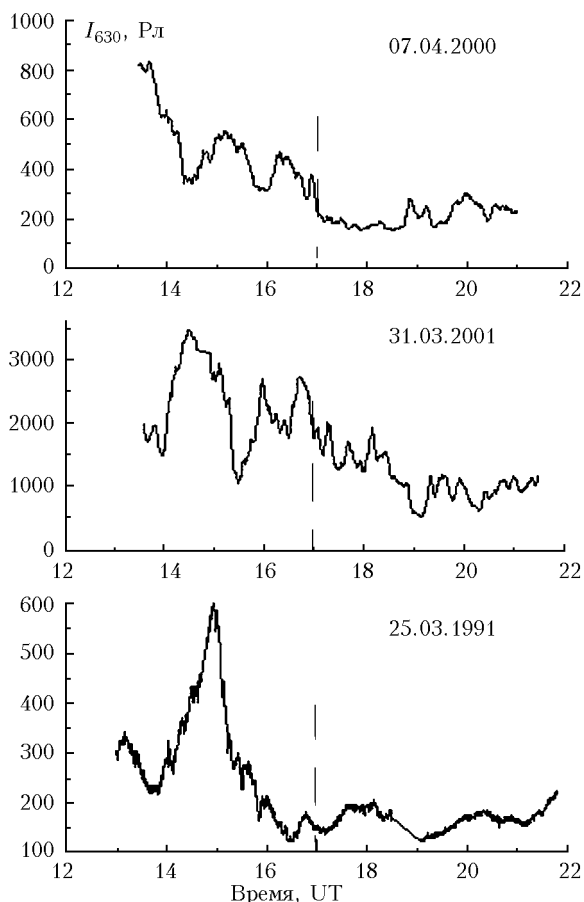


Рис. 2. Ночной ход атмосферной эмиссии 630 нм во время среднеширотных сияний в фазе восстановления магнитных бурь

Согласно [2] основные типы среднеширотных сияний с доминирующей эмиссией 630 нм проецируются в область плазмопаузы. Широтное местоположение станции наблюдения определяет возможность регистрации среднеширотных и субавроральных ионосферных структур и их оптических проявлений с ростом магнитной активности. При увеличении уровня геомагнитных возмущений 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° широты и более [9]. При этом согласно [10] 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 — плазмопауза, диффузная авроральная зона — остаточный плазменный слой и район кольцевого тока.

В связи с этим возмущения эмиссии 630 нм в главные фазы магнитных бурь с характерным временным масштабом ~1 ч и отношением интенсивностей эмиссий $I_{630}/I_{558} > 1$ могут отражать проекцию плазмопаузы и, в соответствии с классификацией среднеширотных форм сияний [2], могут быть отнесены к сияниям типа «d», источником которых являются электроны с энергиями ~10–1000 эВ.

Возмущения эмиссии 630 нм в фазы восстановления магнитных бурь 7 апреля 2000 г. и 31 марта 2001 г. в интервалы времени 14:00–15:30 UT в работах [5–7] интерпретируются как SAR-дуги. Указание о регистрации SAR-дуг в эти ночи в Азиатском регионе отмечается и в работе [3]. Достаточно высокое подобие кривых рис. 2 позволяет предположить, что возмущение эмиссии 630 нм 25 марта 1991 г. в первую половину ночи (14:00–15:00 UT) также может быть обусловлено SAR-дугой. SAR-дуги регистрируются в основном на фазах восстановления магнитных бурь, также наблюдаются в проекциях плазмопаузы, а их источником являются электроны с энергиями < 10 эВ [2].

Особый интерес представляют СС, в которых второй доминирующей эмиссией является эмиссия атомарного кислорода 558 нм и которые нами условно выделены в СС аврорального типа. На рис. 3 показано поведение эмиссий 558 и 630 нм и излучения в спектральной полосе 360–410 нм во время СС 20 ноября 2003 г. Ранее нами уже сообщалось о регистрации в средних широтах возмущения этой эмиссии (до значений ~1,5 кРЛ) в период суббури возмущений во время большой магнитной бури 31 марта 2001 г. [6, 7]. В работах [6, 7] возмущение 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. Нам удалось обнаружить только одну работу, в которой описывается аналогичное возмущение эмиссии 558 нм в период магнитной бури в более низких широтах.

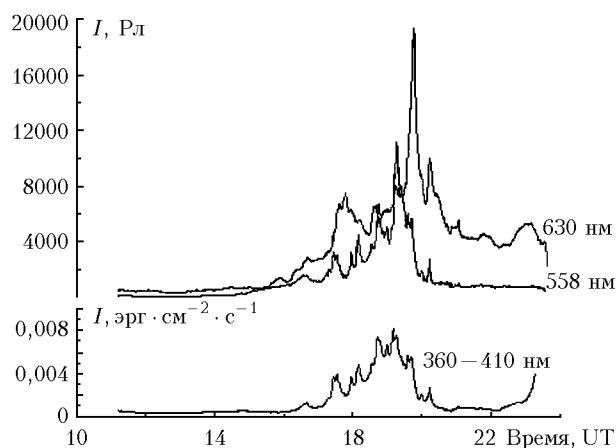


Рис. 3. Поведение атмосферных эмиссий 558 и 630 нм и излучения в спектральном канале 360–410 нм во время среднеширотного сияния 20 ноября 2003 г.

Так, в работе [11] в период интенсивной магнитной бури 21 октября 1989 г. ($K_p^{\max} = 8+$, $D_{st}^{\min} = -268$ нТл) в северной части небосвода на о. Хоккайдо (44° с.ш., 142° в.д.) отмечалось интенсивное красное среднеширотное сияние. Интенсивность эмиссии 558 нм оставалась на обычном уровне за исключением резкого всплеска в течение ~ 8 мин. По мнению авторов [11], подобные сияния на таких низких широтах наблюдаются раз в 20 лет.

Во время СС 20 ноября 2003 г. отмечались и возмущения в спектральном диапазоне 360–410 нм, которые могут быть интерпретированы как появление эмиссии $N_2^+(1NG)$ с длиной волны 391,4 нм, обычно наблюдаемой в полярных сияниях в результате ионизации молекулярного азота высыпающимися электронами. Здесь уместным будет отметить, что согласно [9] в диффузном свечении практически отсутствует свечение в полосе $N_2^+(1NG)$, а интенсивность эмиссии 630 нм в 4 раза выше интенсивности эмиссии 558 нм, что указывает на мягкость спектра вторгающихся электронов в диффузном свечении. Во время СС 20 ноября 2003 г. интенсивность эмиссии 558 нм в отдельный интервал времени превышала интенсивность эмиссии 630 нм, что косвенно может говорить, как и во время магнитной бури 31 марта 2001 г. [6, 7], о высыпании электронов авроральных энергий. В этом случае наблюдаемое СС 20 ноября обладает особенностями, типичными для обычных полярных сияний.

Согласно [1] обычные полярные сияния не опускаются ниже широт, соответствующих L -оболочкам $\sim 2,7$. Соответствующая L -оболочка станции наблюдения геофизической обсерватории ($L \sim 2$) указывает на более значительные смещения ионосферных и магнитосферных структур в период

магнитной бури 20–21 ноября 2003 г., возможно соответствующих предельному сжатию магнитосферы [1]. Связь I_{630} с D_{st} -индексом вариаций геомагнитного поля во время геомагнитных возмущений и анализ таблицы позволяют сделать еще один вывод относительно СС 20–21 ноября 2003 г. Минимальное значение D_{st} -индекса -465 нТл, отмечаемое во время СС 20–21 ноября 2003 г., может быть отнесено к экстремальным значениям за весь период инструментальных наблюдений. В период 1957–2003 гг. только одна магнитная буря (13–14 марта 1989 г.) имела меньшие значения D_{st} . Геомагнитная буря 11 февраля 1958 г., которая сопровождалась знаменитым планетарным среднеширотным сиянием, имела минимальное значение D_{st} -индекса -426 нТл. Зарегистрированные максимальные интенсивности эмиссий 630 нм во время СС 20 ноября 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 ноября 2003 г. В связи с этим, вероятно, СС 20 ноября 2003 г. может также дополнить список наиболее знаменитых сияний (Great aurora), обсуждение которых проводится в ряде работ (см., например, [12]).

Выводы

В зависимости от уровня геомагнитной активности и фазы магнитной бури зарегистрированные в регионе Восточной Сибири среднеширотные сияния во время больших магнитных бурь могут быть отнесены к различным типам среднеширотных сияний: «d» (с преобладанием эмиссии 630 нм), SAR-дугам (630 нм) и авроральному (558 и 630 нм). Каждый из указанных типов среднеширотных сияний характеризуется индивидуальным спектральным составом доминирующих эмиссий и величинами их интенсивностей, различием вероятности регистрации в течение ночи и отражает текущее состояние или динамику магнитосферно-ионосферных структур и их проекций на высоты верхней атмосферы.

Зарегистрированные характеристики среднеширотного сияния 20 ноября 2003 г. во время гигантской магнитной бури, статистика магнитных бурь по D_{st} -индексу и его корреляция с интенсивностью эмиссии 630 нм во время геомагнитных возмущений позволяют предположить, что среднеширотное сияние 20 ноября 2003 г. может быть отнесено к экстремально наблюдаемым как в месте локализации геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, так и в других среднеширотных зонах.

Работа выполнялась при поддержке гранта РФФИ (№ 03-05-64744), гранта № НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации и интеграционного проекта СО РАН № 181.

1. Хорошева О.В. Магнитосферные возмущения и связанная с ними динамика ионосферных электроструй,

- полярных сияний и плазмопаузы // Геомагнетизм и аэрон. 1987. Т. 27. № 5. С. 804–811.
2. *Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A., Slater D.W.* Spectrometric and photometric observations of low-latitude aurorae // *J. Geophys. Res. A.* 1993. V. 98. N 5. P. 7695–7709.
 3. *Shiokawa K., Ogawa T., Oya H., Rich F.J., Yumoto K.* A stable auroral red arc observed over Japan after an interval of very weak solar wind // *J. Geophys. Res. A.* 2001. V. 106. N 13. 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 атмосф. и океана.* 2001. Т. 14. № 10. С. 970–973.
 5. *Afraimovich E.L., Ashkaliev Ya.F., Aushev V.M., Beletsky A.B., Vodyannikov V.V., Leonovich L.A., Lesyuta O.S., Mikhalev A.V., Yakovets A.F.* Radio and optical observations of large-scale traveling ionospheric disturbances during a strong geomagnetic storm of 6–8 April 2000 // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2002. V. 64. N 18. P. 1943–1955.
 6. *Горелый К.И., Карачиев В.Д., Иевенко И.Б., Алексеев В.Н., Михалев А.В., Белецкий А.Б.* 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.
 7. *Дегтярев В.И., Михалев А.В. и Jiyaо Хи.* Вариации свечения ночного неба в Восточной Сибири в период магнитной бури 31 марта – 4 апреля 2001 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2003. Т. 16. № 5–6. С. 552–556.
 8. *Mikhalev A.V.* Night 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.
 9. *Старков Г.В.* Планетарная динамика аврорального свечения // *Физика околоземного космического пространства.* Т. 1. Апатиты: Изд-во Кольск. науч. центра РАН, 2000. 706 с.
 10. *Фельдштейн Я.И., Гальперин Ю.И.* Структура авроральных вторжений в ночном секторе магнитосферы // *Косм. исслед.* 1996. Т. 34. № 3. С. 227–247.
 11. *Miyoka Hiroshi, Hirasava Takeo, Yumoto Kiyohumi, Tanaka Yoshito.* Low latitude aurora on October 21, 1989. I // *Proc. Jap. Acad. B.* 1990. V. 66. N 3. P. 47–51.
 12. *Vallance Jones A.* Historical review of great aurora // *Can. J. Phys.* 1992. V. 70. P. 479–487.

A.V. Mikhalev, A.B. Beletsky, N.V. Kostyleva, M.A. Chernigovskaya. **Characteristics of mid-latitude lights during the large geomagnetic storms in the current solar cycle.**

Characteristics of the most intense mid-latitude lights in the region of Eastern Siberia (52° N, 103° E), observed during the large geomagnetic storms of April 6–7, 2000, March 31, 2001, October 29–31 and November 20–21, 2003 are presented. Depending on the level of geomagnetic activity and the phase of a magnetic storm, the registered mid-latitude lights can be classified to various types: type «d» (with prevalence of 630 nm emission), to SAR-arcs (630 nm), and the auroral type (558 and 630 nm) with manifestation of substorm activity. The feature of primary occurrence of mid-latitude lights at the certain time of day (UT-dependence) and connection with magneto-ionospheric structures are discussed.