

СРЕДНЕШИРОТНЫЕ СИЯНИЯ В 23–24-х СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ЮГЕ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

MID-LATITUDE AURORA IN SOLAR CYCLES 23–24 FROM OBSERVATIONS IN THE SOUTH OF EASTERN SIBERIA

А.В. Михалев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mikhalev@iszf.irk.ru*

A.V. Mikhalev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mikhalev@iszf.irk.ru*

Аннотация. В работе представлены данные наблюдений среднеширотных сияний (СС) на юге Восточной Сибири в 23–24-м солнечных циклах. Рассматриваются спектральный состав и доминирующие эмиссии СС, суточное распределение вероятности регистрации СС, зависимость от уровня геомагнитной активности, принадлежность к различным типам сияний. Показана тесная связь интенсивности доминирующей эмиссии 630.0 нм с *Dst*-индексом во время магнитных бурь (МБ). Отмечается, что наиболее интенсивные СС регистрируются в главные фазы МБ. Зарегистрированное СС 20 ноября 2003 г. может дополнить список наиболее известных сияний (great aurora). Описывается динамика авроральных эмиссий 557.7 и 630.0 нм для очень сильных МБ ($Dst_{\min} < -200$ нТл) 24 марта 1991 г., 6 апреля 2000 г., 30 октября и 20 ноября 2003 г., 17 марта 2015 г. Обсуждаются механизмы возбуждения эмиссий во время магнитных бурь и возможная связь с магнитосферными структурами.

Ключевые слова: среднеширотные сияния, магнитные бури.

Abstract. The paper presents observations of mid-latitude aurora (MA) in the south of Eastern Siberia in solar cycles 23–24. Spectral composition and dominant emissions of MA, daily distribution of MA detection probability, dependence on the level of geomagnetic activity, and classification according to types of aurora are discussed. A close relationship is shown between the intensity of dominant emission at 630.0 nm and the *Dst* index during magnetic storms (MSs). It is pointed out that the most intense MA are recorded during MS main phases. The MA detected on November 20, 2003 can enlarge the list of great aurora. For the severe MSs ($Dst_{\min} < -200$ nT) of March 24, 1991, April 6, 2000, October 30 and November 20, 2003, March 17, 2015, the observed dynamics of 557.7 and 630.0 nm auroral emissions is presented. Mechanisms of emission excitation during geomagnetic storms and a possible connection with magnetospheric structures are discussed.

Keywords: mid-latitude aurora, magnetic storms.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные бури (МБ) относятся к важнейшим геофизическим явлениям солнечного происхождения, вызывающим изменения в характеристиках верхней атмосферы и ионосферы Земли. В средних широтах сильные МБ сопровождаются значительными усилениями запрещенной линии атомарного кислорода [OI] 630.0 нм, когда эта эмиссия, являясь относительно слабой составляющей среднеширотного свечения ночного неба, в течение нескольких часов может возрасти в десятки и более раз. Это приводит к возникновению явления среднеширотного сияния (СС). В литературе отсутствует общепринятое определение СС. Ряд авторов использует понятие «низкоширотная аврора», с которым связывают авроральные эмиссии, наблюдаемые на геомагнитных широтах $\leq 50^\circ$ во время МБ. В то же время другие авторы применяют термин «среднеширотная аврора», используя в качестве отличительных признаков особенности механизмов усиления среднеширотных эмиссий в период МБ, наличие в спектре эмиссии N_2^+ и/или высокое отношение интенсивностей эмиссий [OI] 630.0 и 557.7 нм [Rassoul et al., 1993].

Принято считать, что СС являются относительно редким геофизическим явлением. По данным работы

[Краковецкий и др., 1989], вероятность наблюдения СС и низкоширотных сияний (НС) в Северном полушарии для географических широт $55\text{--}60^\circ$ N составляет пять случаев в год; для широт $50\text{--}55^\circ$ N — 1; $40\text{--}50^\circ$ N — 0.1; в приэкваториальной зоне — 0.01 случая в год. Между тем авторы работы [Shiokawa et al., 2005] полагают, что невидимые (субвизуальные) СС происходят гораздо чаще.

При рассмотрении СС и НС указывается на несколько механизмов возбуждения эмиссий во время МБ. Среди этих механизмов можно отметить выпадения тяжелых частиц (ионов и нейтральных атомов) из кольцевого тока, столкновения с потоками низкоэнергичных электронов и другие [Cole, 1970; Фишкова, Марцваладзе, 1985; Tinsley et al., 1986; Rassoul et al., 1993]. В работе [Rassoul et al., 1993] выделено несколько типов СС и НС. Высыпаясь из кольцевого тока тяжелые частицы с энергиями 1–100 кэВ при перезарядке вызывают на геомагнитных широтах $\leq 40^\circ$ низкоширотные (нейтралы) и $\geq 40^\circ$ среднеширотные (ионы) сияния. Потоки электронов с энергиями ≤ 10 эВ вызывают такое явление, как SAR-дуга, а выпадения электронов с энергиями $\sim 10\text{--}1000$ эВ приводят к СС типа «d».

В настоящей работе представлены некоторые характеристики и особенности СС, выявленные в резуль-

Магнитные бури, в периоды которых наблюдались СС

№	Дата	K_p max за бурю	Dst_{min} за бурю, нТл	Dst_{min} за ночь, нТл	$\Delta I_{630.0}$, кРл	Время регистрации I_{max} , (УТ, ч)
1	1991.03.24	9–	–288	–225	~2.6	~20.5
2	1999.01.13	7 ₀	–112	–112	~0.04	~18
3	2000.04.06	8+	–288	–220	~2.8	~19.5
4	2000.10.04	7+	–182	–143	~0.12	~17.5
5	2000.11.06	7 ₀	–159	–159	~0.11	~18.5
6	2001.03.20	7+	–149	–149	~0.05	~15.5
7	2001.03.31	9–	–387	–284	~3.5	~16
8	2001.10.21	8–	–187	–187	~0.5	~20
9	2002.04.17	7+	–124	–98	~0.075	~19.5
10	2003.10.29	9₀	–350	–281	~2.5	~22.5
11	2003.10.30	9₀	–383	–383	~4	~22
12	2003.11.20	9–	–422	–422	~19.4	~20
13	2004.01.22	7 ₀	–130	–130	~0.07	~14.5
14	2005.05.08	8+	–110	–110	~0.1	~17
15	2011.09.26	6+	–101	–100	~0.4	~17
16	2012.10.08	7–	–106	–106	~0.05	~17.5
17	2013.03.17	7–	–132	–132	~0.1	~19
18	2015.03.17	8–	–222	–187	~14	~15.5
19	2015.10.07	7+	–124	–119	~0.4	~17
20	2015.12.20	7–	–155	–155	~0.45	~19
21	2016.10.13	6+	–104	–103	~0.15	~21

тате наблюдений в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН (52° N, 103° E) в 23–24-м солнечных циклах. Приводятся более детальные, чем в [Михалев, 2013] данные по СС, полученные в периоды сильных и очень сильных МБ.

[<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/color>]. В 2013 г. была введена в эксплуатацию камера всего неба КЕО Sentinel, регистрирующая пространственную картину эмиссии 630.0 нм [<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/keo>].

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

В работе использованы данные наблюдений эмиссий атомарного кислорода 557.7 и 630.0 нм, полученные в ГФО ИСЗФ СО РАН при помощи зенитных фотометров (1989–1993 и 1997–2010 гг.) и патрульного спектрометра с низким спектральным разрешением на базе спектрографа ИСП-51 и цветной ПЗС-матрицы SONY ICX285AQ (2011–2018 гг.). Эмиссионные линии в зенитных фотометрах выделялись при помощи интерференционных качающихся светофильтров с полушириной полосы пропускания $\Delta\lambda_{1/2} \sim 1-2$ нм. Угловое поле зрения в каналах фотометра составляло $\sim 4-5^\circ$. Абсолютная калибровка оптической аппаратуры осуществлялась в отдельные периоды по эталонным звездам и в дальнейшем контролировалась с помощью калибраторов — стабилизированных источников света. Характеристики спектрометра представлены по адресу [<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/spectr>]. Наблюдения до 2012 г. проводились в ночное время в течение 1–2 недель до и после новолуния, а с апреля 2012 г. — каждую ночь. С 2009 г. использовалась цветная широкоугольная камера, предназначенная для исследования пространственно-временных вариаций яркости ночного неба и контроля прозрачности атмосферы

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ряде работ было показано, что одним из геомагнитных индексов, с которым отмечается наиболее высокая корреляция интенсивности эмиссии 630.0 нм ($I_{630.0}$) во время МБ, является Dst -индекс [Трутце, 1973; Rassoul et al., 1992; Лобзин, Павлов, 1998; Михалев и др., 2004]. В связи с этим классификация МБ в этой работе проводится по величине Dst -индекса. Согласно [Gonzalez et al., 1999] по величине Dst -индекса бури подразделяют на умеренные ($-100 < Dst_{min} < -50$ нТл), интенсивные ($-200 < Dst_{min} < -100$ нТл) и экстрabuри ($Dst_{min} < -200$ нТл). Анализ вариаций $I_{630.0}$ во время умеренных, интенсивных и экстрabuри в период 1991–2012 гг. по данным наблюдений в ГФО был выполнен в работе [Михалев, 2013]. В настоящей работе рассматриваются только интенсивные МБ и экстрabuри. В таблице приведены некоторые характеристики СС и сильных МБ, во время которых в ГФО ИСЗФ СО РАН проводились оптические наблюдения: $\Delta I_{630.0}$ обозначает максимальное усиление эмиссии 630.0 нм относительно фонового уровня свечения ночного неба, а в последней колонке приводится время регистрации наибольшей интенсивности этой эмиссии I_{max} в период МБ. Из 21 МБ семь по классификации [Gonzalez et al., 1999] могут быть отнесены к экстрabuриям и 14 к интенсивным МБ. Практически для всех

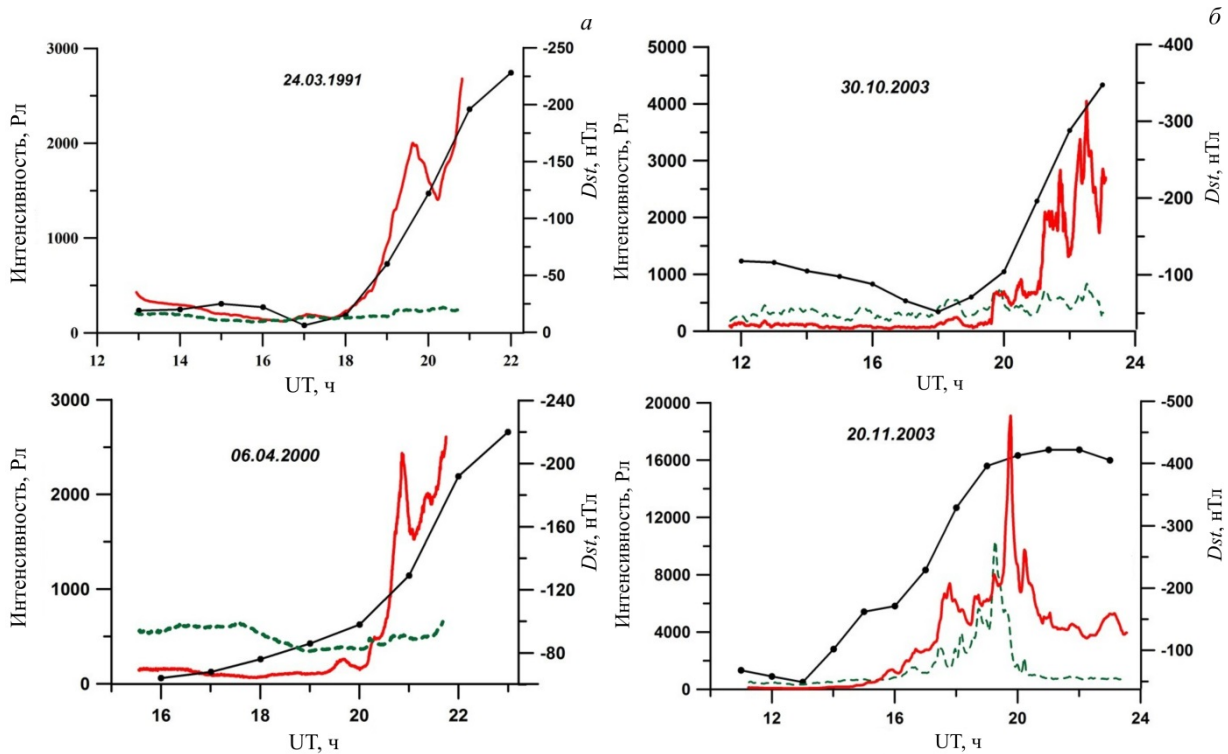


Рис. 1. Вариации интенсивностей эмиссий 630.0 нм (красная линия) и 557.7 нм (зеленая линия) и Dst -индекса (черная линия с кружками) во время магнитных бурь, относящихся по классификации [Gonzalez et al., 1999] к экстрабурям, с максимальными значениями Dst -индекса в течение ночи: ~200–220 нТл (а); ~350–400 нТл (б)

МБ, приведенных в таблице, время наибольшего усиления эмиссии 630.0 нм (I_{\max}) в СС приходится на главные фазы МБ. Исключение составляет магнитная буря 31 марта 2001 г., для которой максимум интенсивности СС наблюдался на фазе восстановления.

На рис. 1 представлена динамика доминирующих эмиссий 630.0 и 557.7 нм для четырех экстрабурь с различными за ночь уровнями максимальных значений Dst -индексов (показаны инвертированные значения): 24 марта 1991 г., 6 апреля 2000 г. ($Dst_{\max} \sim 200\text{--}220$ нТл) и 30 октября и 20 ноября 2003 г. ($Dst_{\max} \sim 350\text{--}400$ нТл).

На рис. 2 представлены вариации интенсивностей эмиссий 630.0 и 557.7 нм и Dst -индекса во время магнитной бури 17 марта 2015 г. Данные наблюдений, приведенные на рис. 1 и 2, соответствуют по времени главной фазе МБ. Среди основных особенностей вариаций интенсивностей эмиссий можно отметить существенное превышение интенсивности эмиссии 630.0 нм над интенсивностью эмиссии 557.7 нм (большое отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$) на главных фазах МБ в отдельные моменты времени. Исключение составляют супербури 20 ноября 2003 г. и МБ 31 марта 2001 г. (фаза восстановления МБ), когда в отдельные моменты времени $I_{557.7}$ превышала $I_{630.0}$. Второй особенностью является корреляция $I_{630.0}$ с инвертированными значениями Dst -индексом на главных фазах МБ. Исключение составляет МБ 17 марта 2015 г. (рис. 2).

Многолетние регулярные наблюдения свечения верхней атмосферы в ГФО позволили установить некоторые особенности вариаций эмиссий 630.0 и 557.7 нм во время МБ, характерные для средних широт Азиатского континента в районе геомагнитного меридиана 177° Е. Ниже приводятся характерис-

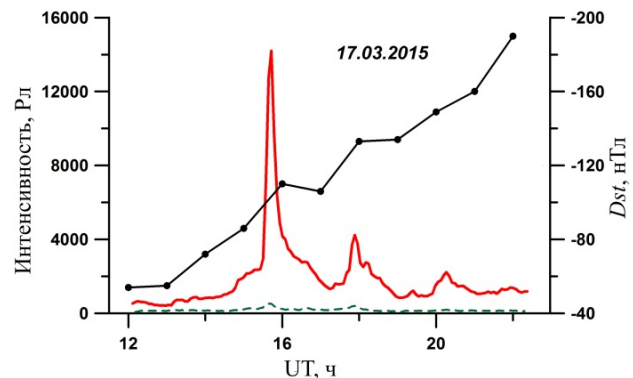


Рис. 2. Вариации интенсивностей эмиссий 630.0 и 557.7 нм и Dst -индекса во время магнитной бури 17 марта 2015 г. Обозначения те же, что и на рис. 1

тики и особенности вариаций эмиссии 630.0 нм во время МБ и их обсуждения.

Суточное распределение вероятности регистрации СС в периоды МБ

Факт существования суточных изменений вероятности появления различных форм полярных сияний (ПС) известен давно (см., например, [Надубович, 1992]). При этом вариации частоты появления ПС на протяжении ночи на разных станциях существенно различаются не только по амплитуде, но и по виду. Среди основных причин, обуславливающих суточный ход регистрации ПС, в ранних работах указывается на изменение положения станции наблюдения относительно аврорального овала в течение ночи. На рис. 3, а приведены ночные распределения максимальных возмущений $I_{630.0}$. На рис. 3, б

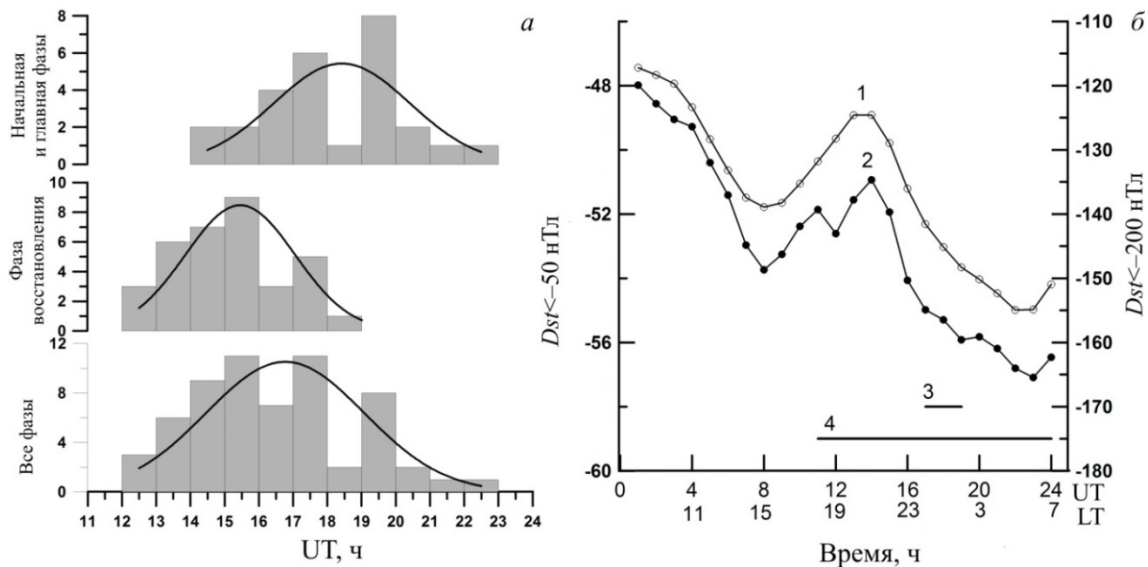


Рис. 3. Суточные (ночные) распределения максимальных возмущений интенсивности эмиссии 630.0 нм во время МБ (а). Суточное распределение *Dst*-индекса [Михалев, 2001] (б): кривые 1 и 2 соответственно — в геомагнитно-возмущенные дни с $Dst \leq -50$ и -200 нТл; прямые 3 и 4 — интервалы темного времени суток в ГФО ИСЗФ СО РАН для летнего и зимнего солнцестояний соответственно

приведены полученные усреднением часовых значений суточные распределения *Dst*-вариаций для геомагнитно-возмущенных дней с $Dst \leq -50$ и ≤ -200 нТл с января 1957 г. по апрель 2000 г. [Михалев, 2001]. Горизонтальными линиями отмечены интервалы темного времени суток для зимнего и летнего солнцестояний, доступные для ночных оптических наблюдений в ГФО ИСЗФ.

Местная полночь соответствует 17 UT. Видно, что возмущения $I_{630.0}$ на главной и начальной фазах МБ регистрируются преимущественно во вторую половину ночи, в то время как на фазе восстановления — в вечерние часы до полуночи. С учетом связи $I_{630.0}$ с *Dst*-индексом данные, приведенные на рис. 3, б, позволили высказать предположение о существовании долготной зависимости наблюдения СС и их форм [Михалев, 2001].

Зависимость от уровня геомагнитной активности

Определенный интерес представляет зависимость $I_{630.0}$ на средних широтах от уровня геомагнитной возмущенности. На рис. 4 приведена зависимость максимального увеличения интенсивности красной линии атомарного кислорода $\Delta I_{630.0}$ от уровня геомагнитной возмущенности (по *Dst*-индексу) для МБ, представленных в таблице. Линия интерполяции на рис. 4 построена без учета максимальной интенсивности во время МБ 17 марта 2015 г. (квадрат на рис. 4).

Полученное уравнение регрессии

$$\lg(I_{630.0}) = -0.0167Dst - 4.14$$

достаточно хорошо совпадает с данными, полученными в работе [Михалев, 2013] с разделением по главным фазам и фазам восстановления МБ.

Интенсивность эмиссии 630.0 нм на главной фазе МБ существенно выше, чем на фазе восстановления МБ [Михалев, 2013].

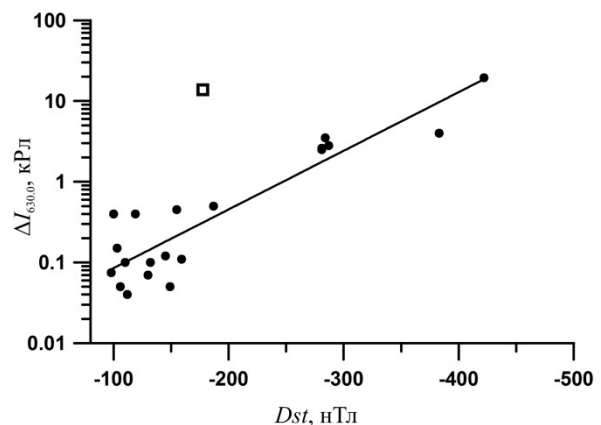


Рис. 4. Зависимость максимального увеличения интенсивности среднеширотной эмиссии 630.0 нм от уровня геомагнитной возмущенности (по *Dst*-индексу)

Исключение составляет МБ 31 марта 2001 г., когда интенсивность эмиссии 630.0 нм на фазе восстановления достигла ~ 3.5 кРл [Дегтярев и др., 2003]. Получено, что коэффициенты в уравнениях регрессии, связывающие усиление $I_{630.0}$ с *Dst*-индексом, на главной фазе и фазе восстановления МБ имеют близкие значения [Михалев, 2013].

Связь с вариациями ионосферных параметров

Связь интенсивности эмиссий в свечении ночного неба на средних широтах с ионосферными параметрами была установлена в ранних исследованиях (см., например, [Barbier, 1959]). В частности, было выявлено, что вариации $I_{630.0}$ достаточно хорошо коррелируют с вариациями параметров F2-области: высотой $h'F2$ и критической частотой f_oF2 (электронной концентрацией). Это относится к слабым и умеренным геомагнитным возмущениям, когда основным механизмом возбуждения эмиссии 630.0 нм в свечении ночного неба является диссоциативная

рекомбинация. При наблюдениях в ГФО этот тип вариаций эмиссии 630.0 нм во время геомагнитных возмущений регистрировался неоднократно. В частности, отмечались события квазисинхронных увеличений $I_{557.7}$ и $I_{630.0}$ при снижении высоты максимума слоя F2 [Leonovich et al., 2012]. В периоды больших МБ, когда к основному механизму возбуждения $I_{630.0}$ добавляется возбуждение за счет высыпания частиц, связь интенсивности эмиссий с ионосферными параметрами носит иной характер (см., например, результаты регистрации СС в ГФО во время МБ 6 апреля 2000 г. [Афраймович и др., 2002]).

Эмиссия [OI] 557.7 нм в средних широтах во время МБ. Отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$ и типы сияний

Известно, что во время магнитных бурь происходит сдвиг полярных сияний в средние широты синхронно с движением границ ионосферных и магнитосферных структур (см., например, [Лазутин, 2015] и цитируемую там литературу). К экватору от аврорального овала регистрируется протяженная полоса свечения атмосферы, получившая название диффузного свечения [Зверев и др., 2012]. В отличие от обычных дискретных ПС эмиссия атомарного кислорода [OI] 557.7 нм не является доминирующей эмиссией в СС и диффузном сиянии [Rassoul et al., 1993; Зверев и др., 2012]. Между тем в ряде работ приводятся результаты наблюдения усиления этой эмиссии во время МБ и обсуждаются возможные механизмы (см., например, [Shiokawa et al., 2005]). По данным в ГФО, усиление $I_{557.7}$ неоднократно отмечалось во время больших МБ как на главной фазе [Михалев, 2001; Михалев и др., 2004], так и на фазе восстановления [Дегтярев и др., 2003]. Наиболее интенсивные возмущения $I_{557.7}$ отмечались во время сильных МБ 31 марта 2001 г., 30 октября и 20 ноября 2003 г., когда интенсивности этой эмиссии в отдельные интервалы времени достигали $\sim 1\text{--}10$ кРл. Резкие и значительные усиления $I_{557.7}$ на широте ГФО могут быть обусловлены увеличением потока высыпающихся энергичных нейтральных атомов из развитого кольцевого тока [Tinsley et al., 1984], локальной токовой системой магнитосферной суббури [Mishin et al., 2018] или процессами активной фазы суббури, которые приводят к расширению овала в экваториальном направлении до средних и низких широт с возможностью высыпания электронов авроральных энергий. Вероятно, резкое усиление эмиссии 557.7 нм на средних широтах во время МБ может указывать на признаки обычного полярного сияния.

Отношение интенсивностей красной и зеленой кислородных эмиссий $I_{630.0}/I_{557.7}$ часто используют для оценки энергии высыпающихся частиц и идентификации типа сияний. Для обычных полярных сияний на высотах менее 150 км величина $I_{630.0}/I_{557.7}$ обычно лежит в пределах $\sim 0.2\text{--}1$ [Омхольт, 1974]. Отношение интенсивностей эмиссий $I_{630.0}/I_{557.7}$ в диффузных сияниях имеет величину $\sim 2\text{--}4$ [Зверев и др., 2012] при энергиях высыпающихся электронов

от ~ 200 эВ [Bame et al., 1967] до 1 кэВ и более [Хорошева, 1987; Simmons, 1998]. Для СС типа «d» (по цветовой классификации — красные сияния) отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$ характеризуется значениями 1–10 (электроны $\sim 10\text{--}1000$ эВ), а для SAR-дуг более 10 (электроны ~ 10 эВ) [Rassoul et al., 1993]. На рис. 5 представлены вариации $I_{630.0}/I_{557.7}$ для некоторых рассматриваемых МБ.

Диффузное сияние формируется в результате прямого вторжения электронов плазменного слоя, которые без ускорения высыпаются в верхнюю атмосферу. В вечернем секторе диффузное сияние вызывается мягкими электронами. В утренние часы наблюдается более сложная структура диффузных сияний. Во время магнитосферных возмущений энергичные электроны дрейфуют с ночной стороны на дневную [Старков, 2000]. Область диффузного свечения пространственно совпадает с областью мягких электронных вторжений, простирающейся к экватору от границы овала до широты проекции плазмопаузы вдоль магнитных силовых линий на ионосферу [Fairfield, Vinos, 1984; Зверев и др., 2012], в то время как СС типа «d», так же как и SAR-дуги, связывают с проекцией плазмопаузы.

Согласно [Гальперин и др., 1977; Fairfield, Vinos, 1984; Хорошева, 1987] низкоширотная граница диффузных высыпаний определяет внутреннюю границу плазменного слоя и в момент суббури, смещаясь вглубь магнитосферы, может достигать плазмопаузы.

Вероятно, такая ситуация реализуется в первую очередь для сильных МБ, которые и рассматриваются в настоящей работе. В этом случае можно предпо-

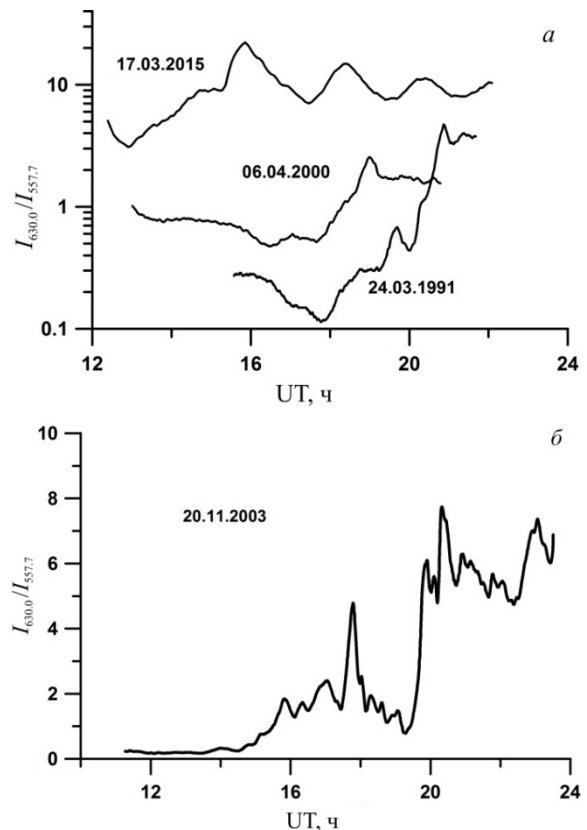


Рис. 5. Вариации отношения $I_{630.0}/I_{557.7}$ для магнитных бурь 24 марта 1991 г., 6 апреля 2000 г., 17 марта 2015 г. (а) и магнитной супербури 20 ноября 2003 г. (б)

ложить, что диффузное свечение, имеющее проекцию на внутреннюю границу плазменного слоя, и сияния типа «d», ассоциирующие с плазмопаузой [Rassoul et al., 1993], могут наблюдаться (вероятно, на разных высотах в силу различных энергий высыпающихся электронов) одновременно, образуя смешанный тип сияний из диффузного свечения и высотного красного сияния типа «d». Учитывая, что диффузное свечение и красное высотное сияние имеют некоторые похожие характеристики, такие как большое отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$ и диффузный характер свечения, в отдельные интервалы времени их идентификация может вызывать определенные трудности. В этом смысле может быть показательно поведение отношения $I_{630.0}/I_{557.7}$ во время МБ 20 ноября 2003 г. (рис. 5). В интервале 16–19 UT на главной фазе МБ это отношение изменялось в диапазоне 1.5–4 (что типично как и для диффузного свечения, так и сияния типа «d»), а в интервале 20–23 UT при переходе к фазе восстановления МБ, когда интенсивность эмиссии 557.7 резко упала почти до предбурового значения, отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$ возросло до 5–7. Если это резкое изменение $I_{630.0}/I_{557.7}$ попытаться связать с движением магнитосферных структур, то изменения $I_{630.0}/I_{557.7}$ до 19 UT, вероятно, можно связывать с проекцией внутренней границы плазменного слоя (электроны ~1 кэВ), а возросшее значение $I_{630.0}/I_{557.7}$ после 19 UT — с проекцией плазмопаузы, области с более мягкими электронами (~10–1000 эВ).

В работе [Mishin et al., 2018] для бури 20 ноября 2003 г. отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$ использовалось для оценки энергии высыпающихся электронов, которая составила < 0.3 кэВ. Полученное значение энергии высыпающихся электронов < 0.3 кэВ, согласно классификации [Rassoul et al., 1993], может указывать на реализацию среднеширотного сияния типа «d».

Эмиссии [NI] и $N_2^+(1NG)$ в средних широтах во время МБ

В спектре излучения СС, кроме доминирующих авроральных эмиссий 557.7 и 630.0 нм, характерных и для среднеширотного излучения атмосферы, регистрируется усиление или появление нетипичных для средних широт эмиссий, таких как эмиссия атомарного азота [NI] 520 нм и полосы $N_2^+(1NG)$ [Rassoul et al., 1993].

Эмиссия [NI] 520 нм (дуплет [NI]₂₁ 519.85 и 520.07 нм), согласно [Chamberlan, 1961], часто появляется в виде умеренно интенсивной линии в спектрах сияний, наблюдавшихся на низких широтах. Потенциал возбуждения этой эмиссии составляет несколько электровольт, что может указывать на соответствующие энергии электронов или на популяцию электронов температурой $kT \sim 1$ эВ.

Полосы $N_2^+(1NG)$ наблюдаются в обычных полярных сияниях при ионизации молекулярного азота в результате высыпания электронов авроральных энергий [Омхольт, 1974]. В среднеширотных сияниях их также связывают с возбуждением молекул азота энергичными (~1–100 кэВ) тяжелыми частицами-нейтралями (на геомагнитных широтах $\leq 40^\circ$) и/или ионами (на геомагнитных широтах $\geq 40^\circ$), высыпавшимися из развитого кольцевого тока

[Rassoul et al., 1993]. Заметим, что в диффузном свечении практически отсутствует свечение в полосах $N_2^+(1NG)$ [Старков, 2000]. В то же время при некоторых анализируемых в настоящей работе МБ также отмечалось появление эмиссии [NI] 520 нм (26 сентября 2011 г. и 17 марта 2015 г.) и полос $N_2^+(1NG)$ 391.4 и 586.7 нм (20 ноября 2003 г. и 17 марта 2015 г.) [Михалев и др., 2004, 2018; Mishin et al., 2018].

Следует указать на интересную особенность, отмеченную в работе [Шуйская, 1970] при описании красных сияний на средних широтах во время сильных и очень сильных бурь в 1957–1959 гг., которая может быть полезна при определении типа сияний. Практически во всех случаях для таких сияний отмечались достаточно долгоживущие микропульсации в горизонтальной составляющей магнитного поля с периодом 3–10 мин. Для МБ 20 ноября 2003 г. также отмечались магнитные пульсации с такими периодами в интервале ~16–20 UT, когда отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$ находилось в диапазоне 1.5–4, и практически отсутствовали после 20 UT, когда отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$ возросло до 5–7 [Mishin et al., 2018].

Связь интенсивности эмиссии 630.0 нм с *Dst*-индексом во время МБ позволяет сделать следующий вывод относительно СС 20 ноября 2003 г. Минимальное значение *Dst* = –465 нТл во время МБ 20 ноября 2003 г. может быть отнесено к экстремальным значениям за весь период инструментальных наблюдений. В период 1957–2012 гг. только одна МБ (13–14 марта 1989 г.) имела меньшие значения *Dst*-индекса. Геомагнитная буря 11 февраля 1958 г., которая сопровождалась знаменитым планетарным СС, имела минимальное значение *Dst* = –426 нТл. Максимальные значения $I_{630.0}$ во время СС 20 ноября 2003 г. являются наибольшими за весь период проведения оптическими наблюдений в ГФО ИСЗФ СО РАН. Это относится и к возмущению эмиссии 557.7 нм, зарегистрированному во время СС 20 ноября 2003 г. Вероятно, это СС может дополнить список наиболее известных сияний (great aurora), обсуждение которых приводится в ряде работ [Vallance Jones, 1992].

SAR-дуги

По классификации [Rassoul et al., 1993] SAR-дуги относятся к среднеширотным сияниям. В настоящее время установлено [Cole, 1970; Kozyra et al., 1997], что SAR-дуги по силовым линиям магнитного поля сопряжены с областью взаимодействия горячих частиц кольцевого тока и холодной внешней плазмосферы и, вероятней всего, «отображают радиальный градиент плотности холодной плазмы, где происходит процесс нагрева плазмосферных электронов энергичными ионами кольцевого тока» [Иевенко, Алексеев, 2004]. При этом следует иметь в виду, что SAR-дуги часто связывают с проекцией плазмопаузы и, соответственно, с экваториальной стенкой главного ионосферного провала [Хорошева, 1987]. Считается, что непосредственным источником возбуждения эмиссии 630.0 нм (уровень ¹D) являются электроны с энергиями меньше 10 эВ [Rassoul et al., 1993].

По данным наблюдений в ГФО к настоящему времени только четыре события были отнесены к SAR-ду-

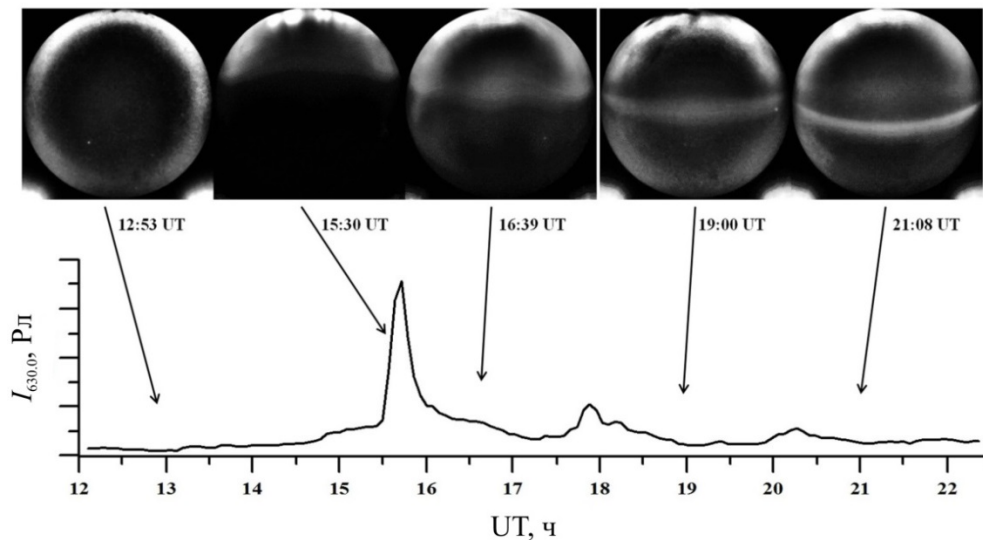


Рис. 6. Изображения в эмиссии 630.0 нм, полученные камерой всего неба КЕО в отдельные моменты времени (вверху), в сопоставлении с динамикой эмиссии 630.0 нм, полученной с помощью патрульного спектрографа (внизу) [Михалев и др., 2018]



Рис. 7. Изображения северной части небосвода, полученные широкоугольной цветной камерой «ФИЛИН-1Ц» [<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/color>] во время двух МБ: а — 26 сентября 2011 г., $K_p=6+$, $Dst_{\min}=-101$, 16:48 UT; б — 17 марта 2015 г., $K_p=8-$, $Dst_{\min}=-222$, 15:19 UT

гам: 25 марта 1991 г., 7 апреля 2000 г., 31 марта 2001 г. [Михалев и др., 2005] и 17 марта 2015 г. [Михалев и др., 2018].

На рис. 6 представлены изображения в эмиссии 630.0 нм, полученные камерой всего неба КЕО в отдельные моменты времени, в сопоставлении с динамикой эмиссии 630.0 нм, полученной по данным патрульного спектрографа [Михалев и др., 2018]. Регистрируемая SAR-дуга перемещалась в южном направлении со средней скоростью ~ 20 м/с (рассчитанной для высоты ~ 400 км). Скорость смещения и размеры дуги соответствуют параметрам SAR-дуг, приводимым в работе [Иевенко, Алексеев, 2004].

Цвет и высотная локализация СС

Считается, что красные сияния типа «а» или «d» высвечиваются существенно выше обычных форм

ПС. «Красивейшие темно-красные образования» наблюдаются на высотах 300–400 км [Акасофу, 1966]. На рис. 7 представлены изображения северной части небосвода при ракурсных наблюдениях СС во время МБ 26 сентября 2011 г. и 17 марта 2015 г. с разными уровнями геомагнитной возмущенности. Можно отметить наличие протяженных областей с преобладанием красных оттенков, обусловленных преобладанием интенсивности красной эмиссии 630.0 нм атомарного кислорода над суммарной интенсивностью всех остальных эмиссий и континуума в видимой области спектра СС.

В работе [Михалев и др., 2018] для СС 17 марта 2015 г. с использованием ракурсности наблюдений было оценено высотное распределение эмиссии 630.0 нм. Так, максимум эмиссии 630.0 нм приходился на высоты ~ 200 –300 км, а верхняя граница простиралась до высот ~ 350 –550 км. Полученное высотное рас-

пределение эмиссии 630.0 нм, доминирование этой эмиссии в наблюдаемом спектре и диффузный характер СС 17 марта 2015 г. позволяют по цветовой классификации отнести это сияние к красным сияниям типа «d». Красный цвет сияния, вероятно, может отмечаться и для субвизуальных сияний типа диффузного свечения, наблюдаемого к экватору от овала полярных сияний, с высотами максимума эмиссии 630.0 нм до 320 км [Зверев и др., 2012].

Цветная широкоугольная камера, снимки которой приведены на рис. 7, была запущена в эксплуатацию только в 2009 г. В связи с этим, к сожалению, отсутствуют изображения СС во время анализируемых экстратурь (см. таблицу) до этого года. Это относится и к камере всего неба KEO Sentinel, введенной в эксплуатацию в 2013 г. (изображения в эмиссии 630.0 нм, полученные с ее помощью, представлены на рис. 6).

В то же время в отдельные непродолжительные интервалы наблюдений (при усилении эмиссии 557.7 нм) это СС можно квалифицировать и как сияние типа «a» (красный цвет в верхней части сияния и преобладающий зеленый в нижней).

Для SAR-дуг также типичны большие высоты высвечивания ~400–450 км.

Вероятно, следует отметить, что для рассматриваемых типов сияний: тип «d», SAR-дуги, диффузное свечение — высокое отношение $I_{630.0}/I_{557.7}$ (обуславливающее красный цвет сияний) одновременно с большими высотами наблюдения этих сияний указывает на относительно небольшие энергии высыпавшихся электронов ≤ 1 кэВ [Rees, Luckey, 1974].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Представленные в настоящей работе результаты регистрации СС в течение 23–24-го солнечных циклов позволяют сделать предварительные выводы относительно некоторых характеристик СС, наблюдаемых на юге Восточной Сибири в районе геомагнитного меридиана 177° E.

Наиболее интенсивные СС, соответствующие главной фазе МБ, регистрируются преимущественно во вторую половину ночи. Основной доминирующей эмиссией в СС является эмиссия атомарного кислорода [OI] 630.0 нм.

Для большинства СС отмечается связь интенсивности доминирующей эмиссии 630.0 нм с *Dst*-индексом. При этом $I_{630.0}$ во время супербури может достигать наибольших величин — единицы–десятки килорей на максимальной фазе СС при развитом кольцевом токе. Большие отношения интенсивностей эмиссий 630.0 и 557.7 нм, наблюдаемые в СС, могут указывать на низкие энергии высыпавшихся электронов. Источником таких электронов могут являться область перекрытия плазмопаузы энергичными ионами кольцевого тока (источник электронов с энергиями ≤ 10 –1000 эВ) или внутренняя граница плазменного слоя (источник электронов с энергиями ≤ 1 кэВ), проекции которых во время интенсивных МБ могут смещаться на средние и низкие широты.

Для отдельных МБ также отмечались кратковременные интенсивные возмущения $I_{557.7}$, в отдельные

интервалы времени $I_{557.7} \sim 1$ –10 кРл. На широте ГФО такие возмущения $I_{557.7}$ могут быть обусловлены увеличением потока высыпавшихся энергичных нейтральных частиц из развитого кольцевого тока, расширением аврорального овала в экваториальном направлении до средних и низких широт с возможностью высыпания электронов авроральных энергий при супербурих или локальной токовой системой магнитосферной суббури.

Кроме эмиссий 557.7 и 630.0 нм, характерных для спектра ночного излучения среднеширотной верхней атмосферы, в спектрах СС проявляются эмиссии, нетипичные для средних широт, такие как эмиссия атомарного азота [NI] 520 нм и полосы $N_2^+(1NG)$.

По данным наблюдений в ГФО к настоящему времени только четыре события были отнесены к SAR-дугам: 25 марта 1991 г., 7 апреля 2000 г., 31 марта 2001 г. и 17 марта 2015 г.

Согласно классификации МБ по *Dst*-индексу [Gonzalez et al., 1999] 7 МБ, во время которых в регионе Восточной Сибири регистрировались интенсивные СС, могут быть отнесены к экстратурям. Среднеширотное сияние, зарегистрированное 20 ноября 2003 г., может дополнить список наиболее известных сияний (great aurora).

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 (проведение регулярных оптических наблюдений и формирование базы данных по характеристикам излучения верхней атмосферы в 23–24-х солнечных циклах) и при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00665 (анализ данных наблюдений СС и их возможной связи с ионосферно-магнитосферными структурами). В работе использовались данные оптического комплекса, входящего в состав ЦКП «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С. Полярные сияния // Успехи физических наук. 1966. Т. 89, № 4. С. 669–680.
- Афраймович Э.Л., Яшкалиев Я.Ф., Аушев В.М. и др. Одновременные радиофизические и оптические измерения ионосферного отклика во время большой магнитной бури 6 апреля 2000 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42, № 3. С. 383–393.
- Гальперин Ю.И., Кранье Ж., Лисаков Ю.В. и др. Диффузная зона: 1. Модель экваториальной границы диффузной зоны вторжения авроральных электронов в вечернем и околополуночном секторах // Космические исследования. 1977. Т. 15. С. 421–433.
- Дегтярев В.И., Михалев А.В., 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.
- Зверев В.Л., Фельдштейн Я.И., Воробьев В.Г. Авроральное свечение к экватору от овала полярных сияний // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52, № 1. С. 64–72.
- Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Влияние суббури и бури на динамику SAR-дуги. Статистический анализ // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 5. С. 643–654.
- Краковецкий Ю.К., Лойша В.А., Попов Л.Н. Хронология полярных сияний за последнее тысячелетие // Солнечные данные. 1989. № 5. С. 110–115.
- Лазутин Л.Л. Овал полярных сияний — прекрасная, но устаревшая парадигма // Солнечно-земная физика, 2015. Т. 1, № 1. С. 23–35.

Лобзин В.В., Павлов А.В. Связь интенсивности свечения субавроральных красных дуг с солнечной и геомагнитной активностью // Геомагнетизм и аэронаука. 1998. Т. 38, № 3. С. 49–61.

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.

Михалев А.В. Среднеширотные сияния в Восточной Сибири в 1991–2012 гг. // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 24. С. 78–83.

Михалев А.В., Белецкий А.Б., Костылева Н.В., Черниговская М.А. Среднеширотные сияния на юге Восточной Сибири во время больших геомагнитных бурь 29–31 октября и 20–21 ноября 2003 г. // Космические исследования. 2004. Т. 42, № 6. С. 616–621.

Михалев А.В., Белецкий А.Б., Костылева Н.В., Черниговская М.А. Характеристики среднеширотных сияний во время больших геомагнитных бурь в текущем солнечном цикле // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 1–2. С. 155–159.

Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. и др. Спектральные и фотометрические характеристики среднеширотного сияния во время магнитной бури 17 марта 2015 г. // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 4. С. 54–61. DOI: [10.12737/szf-44201806](https://doi.org/10.12737/szf-44201806).

Надубович Ю.А. Морфологические исследования полярных сияний. Новосибирск: Наука, 1992. 384 с.

Омхольт А. Полярные сияния. М.: Мир, 1974. 246 с.

Старков Г.В. Планетарная динамика аврорального свечения. Физика околоземного космического пространства. Т. 1. Апатиты: Изд-во Кольск. науч. центра РАН, 2000. 706 с.

Трутце Ю.Л. Верхняя атмосфера во время геомагнитных возмущений // Полярные сияния и свечения ночного неба. М.: Наука, 1973. № 20. С. 5–22.

Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М. О поведении эмиссий H β 656.3 нм и [OI] 630 нм верхней атмосферы во время магнитных бурь с внезапным началом // Геомагнетизм и аэронаука. 1985. Т. 27, № 3. С. 509–511.

Хорошева О.В. Магнитосферные возмущения и связанная с ними динамика ионосферных электроструй, полярных сияний и плазмопаузы // Геомагнетизм и аэронаука. 1987. Т. XXVII, № 5. С. 804–811.

Шуйская Ф.К. «Красные сияния» на средних широтах // Полярные сияния и свечения ночного неба. М.: Наука, 1970. № 18. С. 97–103.

Bame S.J., Asbridge J.R., Felthausen H.E., et al. Characteristics of the plasma sheet in the Earth's magnetotail // J. Geophys. Res. 1967. V. 72, N 1. P. 113–129. DOI: [10.1029/JZ072i001p00113](https://doi.org/10.1029/JZ072i001p00113).

Barbier D. Recherches sur la raie 630.0 de la luminescence atmospherique nocturne // Ann. Geophys. 1959. V. 15, N 2. P. 179–217.

Chamberlan J.W. Physics of the Aurora and Airglow. London: Academic Press, 1961. 722 p. (International Geophysics Series, vol. 2).

Cole K.D. Magnetospheric processes leading to mid-latitude aurora // Ann. Geophys. 1970. V. 26, N 1. P. 187–193.

Fairfield D.H., Vinos A.F. The inner edge of the plasma sheet and the diffuse aurora // J. Geophys. Res. 1984. V. 89, N A2. P. 841–854. DOI: [10.1029/JA089iA02p00841](https://doi.org/10.1029/JA089iA02p00841).

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clúa de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms // Space Sci. Rev. 1999. V. 88, iss. 3–4. P. 529–562. DOI: [10.1023/A:1005160129098](https://doi.org/10.1023/A:1005160129098).

Kozyra J.U., Nagy A.F., Slater D.W. High-altitude energy source(s) for stable auroral red arcs // Rev. Geophys. 1997. V. 35, iss. 2. P. 155–190. DOI: [10.1029/96RG03194](https://doi.org/10.1029/96RG03194).

Leonovich L.A., Mikhalev A.V., Leonovich V.A. Covariations in atomic oxygen emissions and ionospheric total electron content during geomagnetic storms // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2012. V. 80, N 5. P. 247–251. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.02.003](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.02.003).

Mishin V.V., Lunyushkin S.B., Mikhalev A.V., et al. Extreme geomagnetic and optical disturbances over Irkutsk during the 2003 November 20 superstorm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 181, pt. A. P. 68–78. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.10.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.013).

Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A. Low-latitude particle precipitation and associated local magnetic disturbance // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, iss. A4. P. 4041–4052. DOI: [10.1029/91JA03028](https://doi.org/10.1029/91JA03028).

Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A., Slater D.W. Spectrometric and photometric observations of low-latitude aurorae // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, iss. A5. P. 7695–7709. DOI: [10.1029/92JA02269](https://doi.org/10.1029/92JA02269).

Rees M.H., Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions. 1. Model computations // J. Geophys. Res. 1974. V. 79, iss. 34. P. 5181–5186. DOI: [10.1029/JA079i034p05181](https://doi.org/10.1029/JA079i034p05181).

Shiokawa K., Ogawa T., Kamide Y. Low-latitude auroras observed in Japan: 1999–2004 // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, iss. A5. A05202. DOI: [10.1029/2004JA010706](https://doi.org/10.1029/2004JA010706).

Simmons D.A.R. A classification of auroral type // J. Br. Astron. Assoc. 1998. V. 108, N 5. P. 247–257.

Tinsley B.A., Rohrbaugh R.P., Rassoul H., et al. Spectral characteristics of two types of low latitude aurorae // Geophys. Res. Lett. 1984. V. 11, iss. 6. P. 572–575. DOI: [10.1029/GL011i006p00572](https://doi.org/10.1029/GL011i006p00572).

Tinsley B.A., Rohrbaugh R.P., Rassoul H., et al. Low-latitude aurorae and storm time current systems // J. Geophys. Res. 1986. V. 91, iss. A10. P. 11257–11269. DOI: [10.1029/JA091iA10p11257](https://doi.org/10.1029/JA091iA10p11257).

Vallance Jones A. Historical review of great aurora // Can. J. Phys. 1992. V. 70, iss. 7. P. 479–487. DOI: [10.1139/p92-083](https://doi.org/10.1139/p92-083).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/spectr> (дата обращения 20 апреля 2019 г.).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/color> (дата обращения 20 апреля 2019 г.).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/keo> (дата обращения 20 апреля 2019 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 20 апреля 2019 г.).

REFERENCES

Afraimovich E.L., Yashkaliev Ya.F., Aushev V.M. Beletsky A.B., Vodyanikov V.V., Leonovich L.A., Lesyuta O.S., Mikhalev A.V., Yakovets A.F. Simultaneous radiophysical and optical measurements of the ionospheric response during a major magnetic storm on April 6, 2000. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2002, vol. 42, no. 3, pp. 383–393. (In Russian).

Akasofu S. Auroras. *Uspehi fizicheskikh nauk* [Advances in the Physical Sciences]. 1966, vol. 89, no 4, pp. 669–680. (In Russian).

Bame S.J., Asbridge J.R., Felthausen H.E., Hones E.W., Strong I.B. Characteristics of the plasma sheet in the Earth's magnetotail. *J. Geophys. Res.* 1967, vol. 72, iss. 1, pp. 113–129. DOI: [10.1029/JZ072i001p00113](https://doi.org/10.1029/JZ072i001p00113).

Barbier D. Recherches sur la raie 630.0 de la luminescence atmospherique nocturne. *Ann. Geophys.* 1959, vol. 15, no. 2, pp. 179–217.

Chamberlan J.W. Physics of the Aurora and Airglow. London, Academic Press, 1961, 722 p. (International Geophysics Series, vol. 2).

Cole K.D. Magnetospheric processes leading to mid-latitude aurora. *Annales de Géophysique.* 1970, vol. 26, no. 1, pp. 187–193.

- Degtyarev V.I., Mikhalev A.V., Jiyao Xu. Variations of the glow of the night sky in Eastern Siberia in the period of magnetic storm from March 31 to April 4, 2001. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2003, vol. 16, no. 5-6, pp. 552–556. (In Russian).
- Fairfield D.H., Vinos A.F. The inner edge of the plasma sheet and the diffuse aurora. *J. Geophys. Res.* 1984, vol. 89, no. A2, pp. 841–854. DOI: [10.1029/JA089iA02p00841](https://doi.org/10.1029/JA089iA02p00841).
- Fishkova L.M., Martsvaladze N.M. On the behavior of HI 656.3 nm and [OI] 630 nm emissions of the upper atmosphere during magnetic storms with a sudden onset. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1985, vol. 27, no. 3, pp. 509–511. (In Russian).
- Galperin Yu.I., Cranier J., Lisakov Yu.V., Nikolaenko L.M., Sinitsyn V.M., Bouvoux J.-A., Khalipov V.L. Model of the equatorward boundary of the auroral electron diffusion precipitation zone in the dusk and nearmidnight sectors. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 1977, vol. 15, no. 3, pp. 421–433. (In Russian).
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clúa de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88, iss. 3-4, pp. 529–562. DOI: [10.1023/A:1005160129098](https://doi.org/10.1023/A:1005160129098).
- Ivenko I.B., Alekseyev V.N. The influence of the substorm and storm on the dynamics of the SAR arc. Statistical analysis. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2004, vol. 44, no. 5, pp. 643–654. (In Russian).
- Khorosheva O.V. Magnetospheric disturbances and the associated dynamics of the ionospheric electrojet, auroras and plasma-pause. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1987, vol. XXVII, no. 5, pp. 804–811. (In Russian).
- Kozyra J.U., Nagy A.F., Slater D.W. High-altitude energy source(s) for stable auroral red arcs. *Rev. Geophys.* 1997, vol. 35, iss. 2, pp. 155–190. DOI: [10.1029/96RG03194](https://doi.org/10.1029/96RG03194).
- Krakovetsky Yu.K., Loisha V.A., Popov L.N. Chronology the auroras for last millennium. *Solnechnye dannye* [Solar Data]. 1989, no. 5, pp. 110–115. (In Russian).
- Lazutin L.L. The auroral oval is a beautiful but outdated paradigm. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2015, vol. 1, no. 1, pp. 23–35. (In Russian).
- Leonovich L.A., Mikhalev A.V., Leonovich V.A. Covariations in atomic oxygen emissions and ionospheric total electron content during geomagnetic storms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 80, no. 5, pp. 247–251. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.02.003](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.02.003).
- Lobzin V.V., Pavlov A.V. The relationship of the intensity of the glow of subauroral red arcs with solar and geomagnetic activity. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1998, vol. 38, no. 3, pp. 49–61. (In Russian).
- Mikhalev A.V. Some particulars in observation of mid-latitude airglows and disturbances of the upper atmosphere emissions during magnetic storms in the Eastern Siberia region. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2001, vol. 14, no. 10, pp. 970–973. (In Russian).
- Mikhalev A.V., Beletsky A.B., Kostyleva N.V., Chernigovskaya M.A. Mid-latitude airglows in the southeast Siberia during strong magnetic storms on October 29–31 and November 20–21, 2003. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2004, vol. 42, no. 6, pp. 616–621. (In Russian).
- Mikhalev A.V., Beletsky A.B., Kostyleva N.V., Chernigovskaya M.A. Characteristics of mid-latitude airglows during strong magnetic storms in the current solar cycle. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2005, vol. 18, no. 01-02, pp. 155–159. (In Russian).
- Mikhalev A.V. Mid-latitude auroras in Eastern Siberia in 1991–2012. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2013, vol. 24, pp. 78–83. (In Russian).
- Mikhalev A.V., Beletsky A.B., Vasilyev R.V., Zherebtsov G.A., Podlesny S.V., Tashchilin M.A., Artamonov M.F. Spectral and photometric characteristics of mid-latitude auroras during the magnetic storm of March 17, 2015. *Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, iss. 4, pp. 42–47. DOI: [10.12737/stp-44201806](https://doi.org/10.12737/stp-44201806).
- Mishin V.V., Lunyushkin S.B., Mikhalev A.V., Klivanova Yu.Yu., Tsegmed B., Karavaev Yu.A., Tashchilin A.V., Leonovich L.A., Penskiy Yu.V. Extreme geomagnetic and optical disturbances over Irkutsk during the 2003 November 20 superstorm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 181, pt. A, pp. 68–78. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.10.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.013).
- Nadubovich Yu.A. *Morfologicheskie issledovaniya polyarnykh siyaii* [Morphological Studies of Auroras]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992, 384 p.
- Omholt A. *Polyarnye siyaniya* [Auroras]. Moscow, Mir Publ., 1974, 246 p. (In Russian). (English edition: Omholt A. The Optical Aurora. Springer-Verlag Berlin – Heidelberg, 1971, 200 p. DOI: [10.1007/978-3-642-46269-6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-46269-6).)
- Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A. Low-latitude particle precipitation and associated local magnetic disturbances. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 97, iss. A4, pp. 4041–4052. DOI: [10.1029/91JA03028](https://doi.org/10.1029/91JA03028).
- Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A., Slater D.W. Spectrometric and photometric observations of low-latitude aurorae. *J. Geophys. Res.* 1993, vol. 98, iss. A5, pp. 7695–7709. DOI: [10.1029/92JA02269](https://doi.org/10.1029/92JA02269).
- Rees M.H., Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions. 1. Model computations. *J. Geophys. Res.* 1974, vol. 79, iss. 34, pp. 5181–5186. DOI: [10.1029/JA079i034p05181](https://doi.org/10.1029/JA079i034p05181).
- Simmons D.A.R. A classification of auroral type. *J. Br. Astron. Assoc.* 1998, vol. 108, no. 5, pp. 247–257.
- Shiokawa K., Ogawa T., Kamide Y. Low-latitude auroras observed in Japan: 1999–2004. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, iss. A5, A05202. DOI: [10.1029/2004JA010706](https://doi.org/10.1029/2004JA010706).
- Shuiskaya F.K. “Red auroras” at mid-latitudes. *Polyarnye siyaniya i svecheniya nochnogo neba* [Auroras and Night Airglows]. Moscow, Nauka Publ., 1970, no. 18, pp. 97–103. (In Russian).
- Starkov G.V. *Planetarnaya dinamika avroral'nogo svecheniya. Fizika okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva* [Planetary Dynamics of Auroral Luminescence. Physics of Near-Earth Space], vol. 1. Apatity: Izd-vo Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN, 2000, 706 p. (In Russian).
- Tinsley B.A., Rohrbaugh R.P., Rassoul H., Barker E.S., Cochran A.L., Cochran W.D., Wills B.J., Wills D.W., Slater D. Spectral characteristics of two types of low latitude aurorae. *Geophys. Res. Lett.* 1984, vol. 11, iss. 6, pp. 572–575. DOI: [10.1029/GL011i006p00572](https://doi.org/10.1029/GL011i006p00572).
- Tinsley B.A., Rohrbaugh R.P., Rassoul H., Sahai Y., Teixeira N.R., Slater D. Low-latitude aurorae and storm time current systems. *J. Geophys. Res.* 1986, vol. 91, iss. A10, pp. 11257–11269. DOI: [10.1029/JA091iA10p11257](https://doi.org/10.1029/JA091iA10p11257).
- Truttse Yu.L. Upper atmosphere during geomagnetic disturbances. *Polyarnye siyaniya i svecheniya nochnogo neba* [Auroras and Night Airglows]. 1973, vol. 20, pp. 5–22. (In Russian).
- Vallance Jones A. Historical review of great aurora. *Can. J. Phys.* 1992, vol. 70, iss. 7, pp. 479–487. DOI: [10.1139/p92-083](https://doi.org/10.1139/p92-083).
- Zverev V.L., Feldshtein Ya.I., Vorobjev V.G. Auroral glow to the equator from the auroral oval. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2012, vol. 52, no. 1, pp. 64–72. (In Russian).
URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/spectr> (accessed 20 June 2019).
URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/color> (accessed 20 June 2019).
URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/keo> (accessed 20 June 2019).
URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (accessed 20 June 2019).

Как цитировать эту статью

Михалева А. В. Среднеширотные сияния в 23–24-х солнечных циклах по данным наблюдений на юге Восточной Сибири. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 4. С. 80–89. DOI: [10.12737/szf-54201909](https://doi.org/10.12737/szf-54201909).