
СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДНЕШИРОТНОГО СИЯНИЯ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 17 МАРТА 2015 г.

SPECTRAL AND PHOTOMETRIC CHARACTERISTICS OF MID-LATITUDE AURORAS DURING THE MAGNETIC STORM OF MARCH 17, 2015

А.В. Михалев

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

А.Б. Белецкий

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

Р.В. Васильев

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

Г.А. Жеребцов

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

С.В. Подлесный

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, step8907@mail.ru*

М.А. Тащилин

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

М.Ф. Артамонов

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

A.V. Mikhalev

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

A.B. Beletsky

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

R.V. Vasilyev

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

G.A. Zherebtsov

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

S.V. Podlesny

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, step8907@mail.ru*

M.A. Tashchilin

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

M.F. Artamonov

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

Аннотация. Исследована пространственно-временная динамика среднеширотного сияния по данным наблюдений на юге Восточной Сибири в ходе большой геомагнитной бури Святого Патрика 17 марта 2015 г. Выполнен морфологический анализ характеристик наблюдаемого сияния. Сделан предварительный вывод, что анализируемое событие является результатом проявления двух форм среднеширотных сияний (тип «d» и SAR-дуга) и обычного полярного сияния, наблюдавшегося у северного горизонта. Максимальная интенсивность доминирующей эмиссии [OI] 630.0 нм (~14 кРл) позволяет отнести данное среднеширотное сияние к экстремальным сияниям, наблюдавшимся в средних широтах, которое уступает лишь сиянию во время супербури 20 ноября 2003 г. (~19 кРл).

Ключевые слова: геомагнитная буря, среднеширотное сияние, спектры среднеширотного сияния, авральные эмиссии 557.7 и 630.0 нм.

Abstract. We study the spatiotemporal dynamics of mid-latitude aurora from observations in the south of Eastern Siberia during St. Patrick's severe geomagnetic storm on March 17, 2015. We perform a morphological analysis of characteristics of the observed auroras. A preliminary conclusion is drawn that the analyzed event is the result of the manifestation of mid-latitude auroras of two types (type "d" and SAR arc) and ordinary aurora observed at the northern horizon. The maximum intensity of the dominant emission [OI] at 630.0 nm (~14 kR) allows this mid-latitude aurora to be attributed to the extreme auroras occurring in mid-latitudes, which is second only to the November 20, 2003 superstorm (~19 kR).

Keywords: geomagnetic storm, mid-latitude aurora, spectrum of mid-latitude aurora, 557.7 and 630.0 nm emissions.

ВВЕДЕНИЕ

Среднеширотные сияния (СС) являются относительно редким геофизическим явлением. По данным работы [Краковецкий и др., 1989], вероятность наблюдения СС в Северном полушарии составляет на географических широтах 55°–60° N пять случаев в год 50°–55° N — 1; 40°–50° N — 0.1. Основной доминирующей эмиссией СС является запрещенная

линия атомарного кислорода [OI] 630.0 нм, интенсивность которой определяется степенью развитости кольцевого тока (Dst -индексом) во время магнитной бури (МБ) [Трутце, 1973; Rassoul et al., 1992; Михалев и др., 2004]. Минимальное значение Dst -индекса (Dst_{min}) для МБ 17 марта 2015 г. составило –222 нТл [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime], что, согласно [Gonzalez et al., 1999], позволяет отнести эту бурю к экстремальным МБ. Последний раз МБ

с $Dst_{\min} < -220$ нТл наблюдалась 15 мая 2005 г. в предыдущем, 23-м солнечном цикле. Таким образом, МБ 17 марта 2015 г. является одной из самых больших (по Dst -индексу) магнитных бурь текущего 24-го солнечного цикла.

В настоящей работе представлены результаты наблюдений СС на юге Восточной Сибири комплексом оптических инструментов во время геомагнитной бури Святого Патрика 17 марта 2015 г. Выполнен предварительный морфологический анализ характеристик наблюдаемого СС, без детального, за некоторыми исключениями, сопоставления с ионосферными, магнитосферными, спутниковыми данными и моделями. Подобное сопоставление, несомненно представляющее большой интерес, может являться предметом дальнейших исследований.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения осуществлялись в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (ГФО) (52° N, 103° E), расположенной в Тункинской долине (с. Торы) на юге Восточной Сибири. В период наблюдения магнитной бури 17 марта 2015 г. комплекс оптических инструментов включал два спектрографа, широкоугольную цветную камеру, камеру всего неба в эмиссии 630 нм и интерферометр Фабри—Перо (630 нм). Все оптические инструменты работали в автоматическом режиме.

Спектрографы. Патрульный спектрограф с низким спектральным разрешением предназначен для регистраций обзорных спектров свечения ночной атмосферы [<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/spectr>]. Во время МБ 17 марта 2015 г. спектрограф был ориентирован в северном направлении с углом возвышения оптической оси над горизонтом $\sim 23^\circ$, время экспозиции составляло 260 с. Описание абсолютной калибровки патрульного спектрографа приводится в работе [Михалев, 2018]. Спектрограф Shamrock SR-303I [Белецкий и др., 2016] также был ориентирован в северном направлении с углом возвышения оптической оси над горизонтом $\sim 30^\circ$. Измерения проводились сериями из 30 кадров с экспозицией 1 с (кадры серии суммируются). Полный рабочий спектральный диапазон спектрографа Shamrock SR-303I — 492–896 нм.

Широкоугольная цветная камера предназначена для регистрации и исследования пространственно-временных вариаций собственного излучения атмосферы ночного неба и контроля прозрачности атмосферы [<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/color>]. Камера была ориентирована на северную часть небосвода, на область полюса мира. Угловое поле зрения камеры составляет $\sim 85^\circ$. Время экспозиции — 300 с.

Камера всего неба KEO Sentinel предназначена для регистрации пространственной картины интенсивности эмиссии 630 нм (высота высвечивания 180–300 км). Полуширина пропускания интерференционного фильтра ~ 2 нм. Направление визирования — зенит, поле зрения 145° , время экспозиции 30 с [<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/keo>].

Интерферометр Фабри—Перо Keo Scientific. Характеристики используемого интерферометра Фабри—Перо (ИФП) изложены в работе [Shiokawa

et al., 2012]. Анализ интерферограмм для получения вариаций интенсивностей линий основан на методе, изложенном в [Harding et al., 2014], а в работе [Васильев и др., 2017] приведены подробности адаптации этой методики для конкретного устройства и используемой программы наблюдений. Во время наблюдения магнитной бури ИФП работал в режиме патрульного обзора пяти направлений — стороны горизонта и зенит.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Геомагнитная буря 17 марта 2015 г., названная по дню начала бурей Святого Патрика, является одной из самых больших геомагнитных бурь 24-го солнечного цикла, а по значению Dst -индекса — самой мощной в этом цикле. Геомагнитный эффект данной бури обусловлен суперпозицией двух последовательных бурь [Kamide, Kusano, 2015].

Особенности спектрального состава СС 17 марта 2015 г. Считается, что в спектрах СС могут появляться или усиливаться линии и полосы, типичные как для собственного излучения среднеширотной атмосферы, так и для полярных сияний (ПС), в частности, линии атомарного кислорода [OI] 557.7 нм и 630.0 нм, азота [NI] 520 нм, полосы первой отрицательной системы $1 N_2^+$ 391.4, 427.8 и 470.9 нм и др. В зависимости от величины и соотношения доминирующих эмиссий СС относят к различным типам [Rassoul et al., 1993].

На рис. 1 представлен типичный спектр в диапазоне длин волн 500–700 нм, зарегистрированный во время МБ спектрографом Shamrock SR-303I.

На рис. 2 показана динамика доминирующих эмиссий 630.0 и 557.7 нм 17 марта 2015 г., полученная по данным наблюдений патрульным спектрографом. Для сравнения на рисунке приведено поведение Dst -индекса за этот же период.

По данным наблюдений в ГФО СС во время больших МБ в предыдущие солнечные циклы [Михалев и др., 2004, 2005] был сделан вывод, что, в зависимости от уровня геомагнитной активности и фазы магнитной бури, СС могут быть отнесены к различным типам: «d» (с преобладанием эмиссии 630.0 нм), SAR-дуга (630.0 нм) и авроральное сияние (557.7 и 630.0 нм). Указанные типы СС различаются спектральным составом, величинами интенсивностей доминирующих эмиссий и вероятностью регистрации в течение ночи, что отражает текущее состояние и динамику магнитосферно-ионосферных структур и их проекций на высоты верхней атмосферы.

По данным оптических наблюдений в ГФО за период 1991–2017 г.г., по максимальной интенсивности доминирующей эмиссии 630.0 нм (~ 14 кРл) анализируемое СС уступает лишь СС во время супербури 20 ноября 2003 г. с $Dst_{\min} = -465$ нТл (~ 19 кРл). При этом во время других больших МБ с меньшими значениями Dst -индекса интенсивности доминирующей эмиссии 630.0 нм не превышали 10.5 кРл (например, МБ 24 марта 1991 г., $Dst_{\min} = -281$; МБ 6 апреля 2000 г., $Dst_{\min} = -287$; МБ 30 октября 2003 г.,

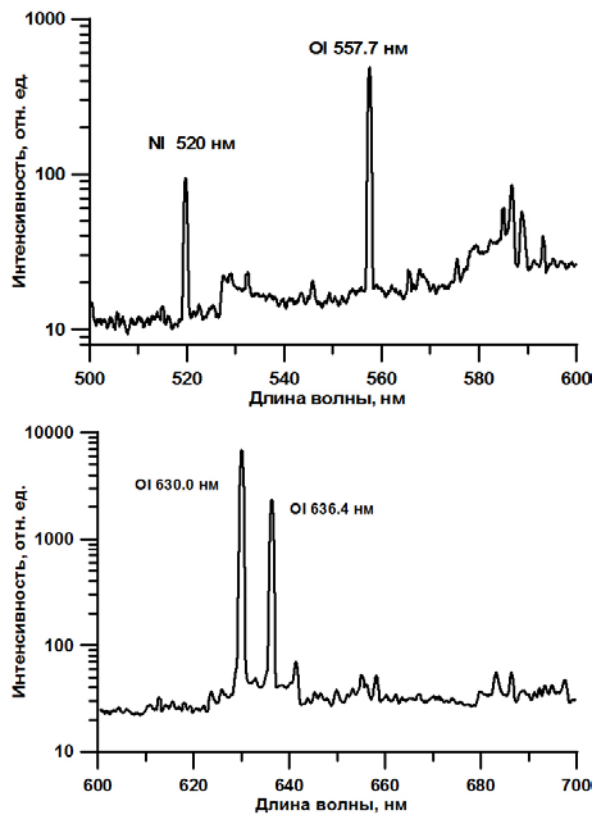


Рис. 1. Спектр СС в диапазоне длин волн 500–700 нм, зарегистрированный во время МБ 17 марта 2015 г. спектрографом Shamrock SR-303I

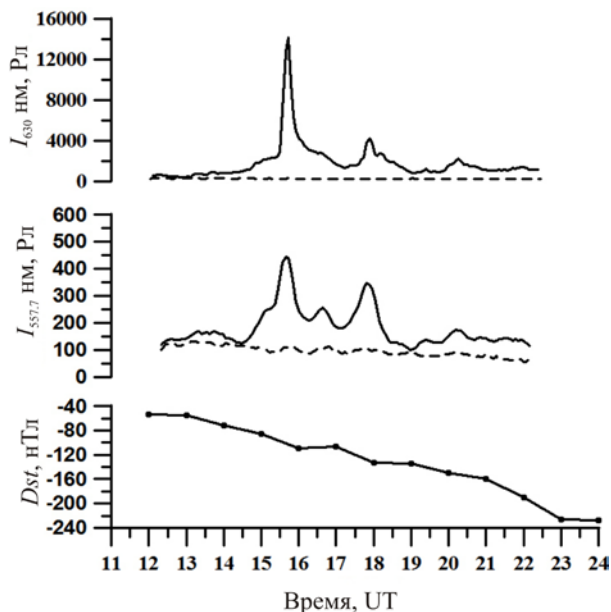


Рис. 2. Поведение эмиссий 630.0 и 557.7 нм и Dst -индекса во время магнитной бури 17 марта 2015 г. Штриховая линия — интенсивность эмиссии в предыдущий невозмущенный день

$Dst_{\min} = -401$ [Михалев и др., 2005]). Другими особенностями события 17 марта 2015 г., нетипичными для наблюдавшихся ранее в ГФО СС, являются отсутствие зависимости эмиссии 630.0 нм от Dst -индекса в течение ночи и наличие выраженных всплесков эмиссии 630.0 нм с характерными длительностями ~ 1 ч, более типичных для суббулевой активности в субавроральных и авроральных широтах. В спектре излучения анализируемого СС, кроме доминирую-

щих авроральных эмиссий 557.7 нм и 630.0 нм, характерных и для среднеширотного излучения атмосферы, зарегистрированы эмиссия [NI] 520 нм и полоса N_2^+ 586.7 нм. Таким образом, по своим спектральным характеристикам СС, наблюдаемое в северной части небосвода, может быть отнесено к типу «d» с наложением в отдельные интервалы времени проявлений суббулевой активности.

Фотометрические ракурсные наблюдения цветной широкоугольной камерой в RGB-каналах. Как уже отмечалось выше, цветная камера во время МБ 17 марта 2015 г. была ориентирована в северном направлении. На рис. 3, а показаны изображения северной части небосвода в R-, G- и B-каналах, полученные камерой в 15:22 UT.

Наблюдаемые на рис. 3 диффузные распределения яркости, занимающие большую часть северной области небосвода в R-канале и локализованные у горизонта в G-канале, сохранились практически в течение всей ночи 17 марта 2015 г. Используя спектральные характеристики R-, G- и B-каналов и особенности спектрального состава излучения верхней атмосферы во время СС (см. рис. 1–2), в рамках некоторых предположений можно оценить южную границу высыпаний во время исследуемой МБ. Так, в работах [Подлесный, Михалев, 2015; Михалев и др., 2016] было показано, что возмущения в R-канале цветной камеры во время МБ 17 марта 2015 г. в большей степени обусловлены усилением интенсивности эмиссии 630.0 нм. Если допустить, что возмущения в G-канале подобным образом связаны с усилением эмиссии 557.7 нм, то пространственно-временные вариации яркостей изображений в R- и G-каналах могут быть обусловлены изменениями интенсивностей эмиссий 630.0 нм и 557.7 нм соответственно. Считается, что в полярном сиянии доминирующей является эмиссия 557.7 нм с характерными высотами высвечивания ~ 90 – 110 км [Омхольт, 1974]. Таким образом, зная угловую высоту максимальной области высвечивания у горизонта в G-канале, которая в нашем случае составляла $\sim 8^\circ$ – 10° , можно оценить расстояние до области высвечивания. Исходя из полученных данных, расстояние до «видимой» зоны высыпания можно оценить как ~ 530 – 785 км, что соответствует смещению на север от точки наблюдения на $\sim 5^\circ$ – 7° от геомагнитной широты ГФО ИСЗФ СО РАН (47.9° N).

Изображения СС, полученные в R-канале цветной камеры, имели существенно большие угловые размеры, чем изображения в канале G. Кроме области, совпадающей со свечением в канале G на угловых высотах 8° – 10° , отмечалось интенсивное свечение в диапазоне углов $\sim 10^\circ$ – 35° над горизонтом с максимумом интенсивности в районе 22° . Как уже говорилось, возмущения в R-канале цветной камеры во время МБ 17 марта 2015 г. можно связать с усилением интенсивности эмиссии 630.0 нм [Подлесный, Михалев, 2015; Михалев и др., 2016]. В таком случае в предположении, что зона излучения линии 630.0 нм совпадает с зоной излучения линии 557.7 нм с оцененной дальностью ~ 530 – 785 км от места наблюдения, можно оценить высотное распределение эмиссии 630.0 нм во время СС. Так, максимум эмис-

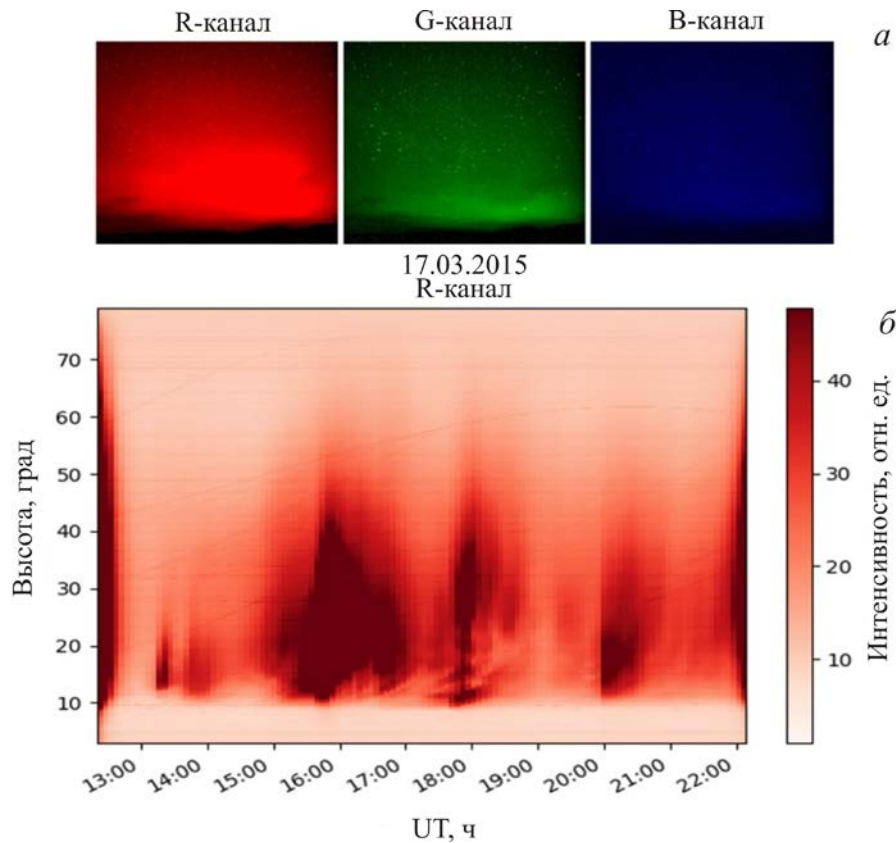


Рис. 3. Изображения северной части небосвода в R-, G- и B-каналах, полученные цветной камерой в ГФО ИЗСФ СО РАН в 15:22:30 UT (а); кеограмма СС в R-канале (б)

сии 630.0 нм приходится на высоты $\sim 200\text{--}300$ км, а верхняя граница находится на высотах $\sim 350\text{--}550$ км. Большая высота максимума эмиссии 630.0 нм и вертикальная протяженность СС в эмиссии 630.0 нм, как и в основном диффузный характер свечения, позволяют по цветовым характеристикам отнести это сияние к красным сияниям типа «d» (красный цвет всего сияния типичен для сияний субавроральной области, характеризующихся большими (сотни километров) высотами). В то же время в отдельные непродолжительные интервалы наблюдений (например, в 16:30–18:30 UT при усилении эмиссии 557.7 нм) это сияние можно квалифицировать и как сияние типа «a» (красный цвет в верхней части сияния и преобладающий зеленый в нижней). Считается, что непосредственным источником возбуждения эмиссии 630.0 нм (уровень 1D) в СС типа «d» являются электроны с энергиями $\sim 10\text{--}1000$ эВ [Rassoul et al., 1993]. Таким образом, данные цветной камеры позволяют дополнить спектральные наблюдения, например, определить, что по своим цветовым характеристикам СС 17 марта 2015 г. может быть отнесено к красному высотному сиянию типа «d» и, в отдельные интервалы времени, к сиянию типа «a», а также оценить расстояние до экваториальной границы регистрируемого СС, которое составляет $\sim 530\text{--}785$ км, что соответствует геомагнитным широтам $\sim 47^\circ\text{--}49^\circ$.

Фотометрические наблюдения камерой всего неба КЕО в эмиссии 630.0 нм. Угловое поле зрения камеры всего неба КЕО составляет $\sim 145^\circ$. При ори-

ентации в зенит она фиксирует изображения на угловых высотах более 18.5° над горизонтом, что позволяет сопоставлять динамику яркостей изображений в северном направлении с данными спектрографов. На рис. 4 представлены изображения в эмиссии 630 нм, полученные камерой всего неба КЕО в 12:53, 15:30, 16:39, 19:00 и 21:08 UT, в сопоставлении с динамикой эмиссии 630 нм, полученной с помощью патрульного спектрографа.

Анализ изображений в эмиссии 630.0 нм (рис. 4) позволяет выделить несколько характерных стадий развития анализируемого СС. Первая стадия (12:15–13:00 UT) характеризует послесумеречные невозмущенные условия. На рис. 4 этой стадии соответствует первое слева изображение (усиление яркости у горизонта в виде круга связано с эффектом Ван Райна, обусловленным увеличением оптической толщи светящегося слоя к горизонту). Вторая стадия ($\sim 13:00$ до 13:30 UT) связана с появлением у северного горизонта диффузного пятна, перемещающегося вдоль горизонта. Во время следующей стадии ($\sim 13:45\text{--}15:30$ UT) отмечается формирование второго слоя слабого свечения (экваториальной зоны диффузного пятна), которое медленно смещается в экваториальном направлении. С 15:30 UT и до окончания наблюдений у северного горизонта постоянно регистрируются изменяющиеся по форме пятна свечения (второе слева изображение на рис. 4), вероятно являющиеся проявлением обычных полярных сияний. При этом второй слой свечения, изменяясь по форме (иногда с волнистой экваториальной

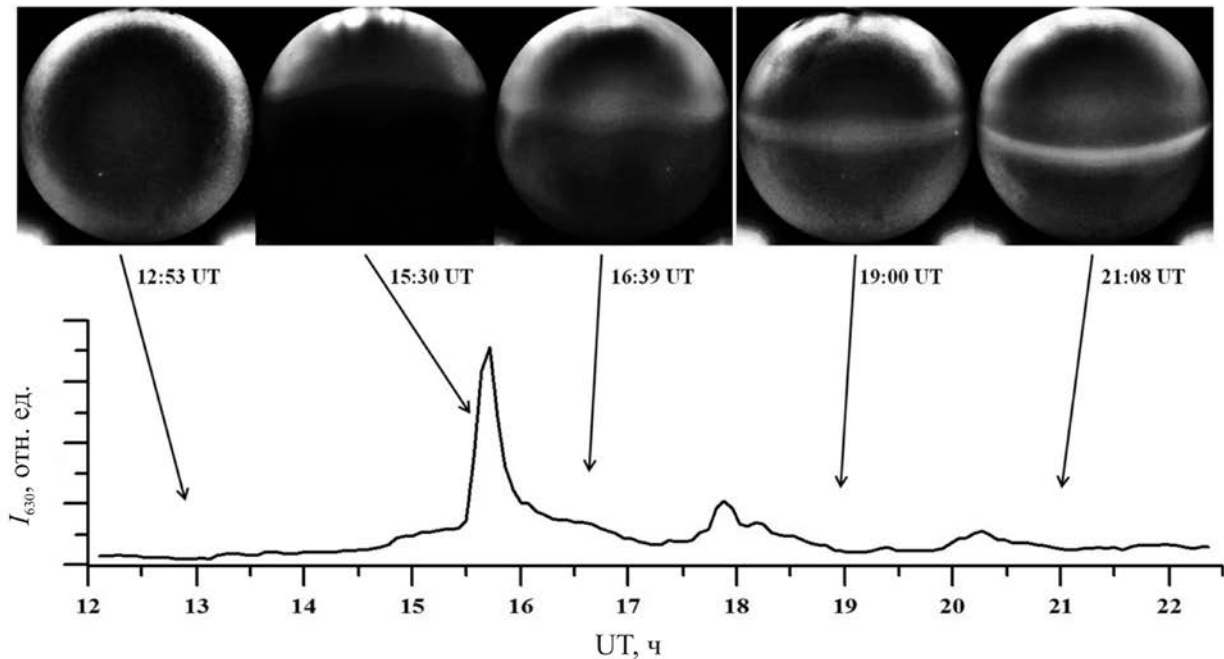


Рис. 4. Изображения в эмиссии 630.0 нм, полученные камерой всего неба КЕО в 12:53, 15:30, 16:39, 19:00 и 21:08 UT (вверху), в сопоставлении с динамикой эмиссии 630.0 нм, полученной с помощью патрульного спектрографа (внизу)

границей) и интенсивности, в околозенитной области приобретает форму дуги, напоминающей известные SAR-дуги [Rees, Roble, 1975], которая медленно перемещаясь к экватору, становится более четко очерченной (см. рис. 4). В отдельные интервалы времени можно выделить появление второй, менее слабой дуги, расположенной северной основной дуги (см. на рис. 4 первое изображение справа).

Регистрируемая дуга передвигается на юг со средней скоростью ~ 20 м/с (рассчитанной для высоты высвечивания ~ 400 км). Движение дуги по широте хорошо коррелирует с изменением *Dst*-индекса. Скорость смещения и размеры регистрируемой дуги соответствуют параметрам SAR-дуг, приводимым в работе [Иевенко, Алексеев, 2004].

В пользу интерпретации представленных на рис. 4 изображений как явления SAR-дуги свидетельствует то обстоятельство, что во время этой магнитной бури на субавроральной оптической станции «Маймага» в Якутии (63° N, 129.5° E) в вечернем секторе MLT также регистрировалась интенсивная SAR-дуга [Ievenko, Parnikov, 2017].

На кеограмме в $\sim 15:00$ – $15:30$ UT (рис. 3, б) также можно выделить структуру, перемещающуюся от меньших угловых высот к большим и отвечающую моментам времени начала формирования SAR-дуги по данным камеры всего неба (см., например, второе слева изображение на рис. 4).

По классификации [Rassoul et al., 1993], SAR-дуги относятся к среднеширотным сияниям. В настоящее время установлено, 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 частицами 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 (ГИП) [Хорошева, 1987]. Считается, что непосредственным источником возбуждения эмиссии 630.0 нм (уровень 1D) являются электроны с энергиями < 10 эВ [Rassoul et al., 1993].

Таким образом, из анализа данных наблюдений камерой всего неба в эмиссии 630.0 нм следует, что в течение всей ночи у северного горизонта постоянно регистрировались изменявшие форму пятна свечения, которые, вероятно, являются проявлением обычных полярных сияний.

В интервале времени ~ 16 – 21 UT в околозенитной области регистрировалась достаточно интенсивная SAR-дуга, что может указывать на смещение во время этой бури экваториальной стенки ГИП до геомагнитной широты $\sim 47.9^\circ$ N в рассматриваемом долготном секторе.

Интерферометрические наблюдения в эмиссии 630.0 нм

На рис. 5 представлены результаты измерений интенсивности эмиссии 630.0 нм и доплеровской температуры T_{630} в трех направлениях — север, зенит, юг — под зенитными углами 60° , 0° и 60° соответственно.

Северное направление визирования ИФП и спектрографов практически совпадает, вследствие чего динамика интенсивности эмиссии 630.0 нм в этом направлении также почти идентична (см. рис. 2). Следует отметить (рис. 5) одновременно большой градиент интенсивностей между северным направлением и направлениями в зенит и на юг и практически одинаковый средний уровень доплеровских температур $T_{630} \sim 1450$ – 1650 К после 15 UT в этих трех направлениях. Нагрев верхней атмосферы во время

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В настоящее время в литературе отсутствует общепринятое понятие среднеширотного сияния. Ряд авторов использует термин «низкоширотная аврора», обозначая им авроральные эмиссии, наблюдаемые во время МБ на геомагнитных широтах $\leq 50^\circ$. В то же время другие авторы применяют термин «среднеширотная аврора», используя в качестве отличительных признаков наличие в спектре эмиссии N_2^+ и высокое отношение r интенсивностей эмиссий 630.0 и 557.7 нм [Rassoul et al., 1993]. Согласно [Rassoul et al., 1993], СС характеризуются некоторыми отличительными признаками, позволяющими отделить их от обычных полярных сияний. Так, по классификации [Rassoul et al., 1993] СС, обусловленные высыпанием электронов, характеризуются отношением интенсивности красной линии 630.0 нм к интенсивности зеленой линии 557.7 нм $r > 10$ для SAR-дуг и $1 < r < 10$ для СС типа «d», тогда как для обычных полярных сияний эта величина обычно лежит в пределах $\sim 0.2-1$ [Омхольт, 1974]. Спектральные измерения спектрографами под небольшими углами над горизонтом во время анализируемого сияния 17 марта 2015 г. не позволяют корректно определить значение r в связи с возможным широтным разнесением эмиссионных слоев 630.0 и 557.7 нм. Тем не менее высокая интенсивность эмиссии 630.0 нм, существенно превышающая интенсивность эмиссии 557.7 нм, и преобладание сигналов в красном канале над сигналами в зеленом канале по данным цветной широкоугольной камеры на больших угловых высотах косвенно указывают на достаточно высокое значение $r > 1$. Это может служить аргументом для идентификации этого сияния как среднеширотного.

Еще одной особенностью СС, отмечаемой во многих работах [Трутце, 1973; Rassoul et al., 1992; Михалев, 2001; Михалев и др., 2004], является выраженная зависимость основной доминирующей эмиссии СС 630.0 нм от степени развитости кольцевого тока во время МБ (по Dst -индексу), что связано с некоторыми различиями в механизмах формирования среднеширотных и полярных сияний. В нашем случае эта зависимость нарушается интенсивными всплесками эмиссии 630 нм, вероятно, суббуревой природы, что указывает на возможность интерпретации этого сияния и как обычного полярного сияния. В связи с изложенным выше можно предположить, что на главной фазе МБ 17 марта 2015 г. в ГФО одновременно регистрировались СС и обычное полярное сияние, поэтому вынесенный в название данной статьи термин «среднеширотное сияние» достаточно условен.

Таким образом, по результатам исследования СС, наблюдавшегося на юге Восточной Сибири во время геомагнитной бури Святого Патрика 17 марта 2015 г., можно сделать предварительный вывод, что анализируемое СС является нетипичным для рассматриваемой широтно-долготной зоны. Вероятно, во время главной фазы этой МБ реализовались геофизические условия, позволившие одновременно зарегистрировать среднеширотные (тип «d» и SAR-дуга) и авроральные (тип «a») формы сияний.

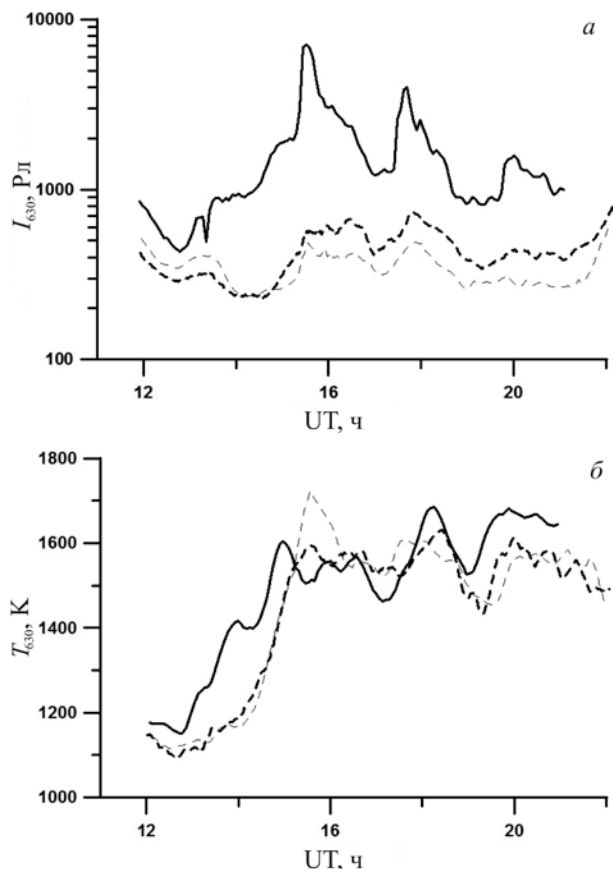


Рис. 5. Результаты измерений интенсивности эмиссии 630.0 нм и доплеровской температуры в трех направлениях: толстые сплошные линии — на север; утолщенные штриховые — в зенит; тонкие штриховые — на юг

время геомагнитных бурь и повышение доплеровской температуры, измеренной по эмиссии 630.0 нм, достаточно хорошо известны [Трутце, 1973; Earle et al., 2013]. В настоящее время среди возможных причин увеличения температуры нейтральной атмосферы во время геомагнитных бурь рассматривают джоулеву диссипацию токов в авроральной области на высотах нижней термосферы ($\sim 100-140$ км) с последующим переносом возмущенной области в экваториальном направлении за счет возникающей дополнительной циркуляции [Данилов, 2013; Earle et al., 2013]. В субавроральной ионосфере на высотах более 200 км возможен фрикционный нагрев в широкой полосе субавроральных ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F ионосферы. Эти дрейфы наиболее заметно проявляются во время суббурь на фоне крупномасштабной конвекции плазмы [Zhang, 2017]. Данные ИФП, показывающие увеличение T_{630} для всех направлений визирования от $\sim 1100-1150$ К в начале измерений до $\sim 1450-1650$ К в 15–16 UT, не противоречат экспериментальным данным и существующим представлениям о возможных механизмах нагрева нейтральной атмосферы на высотах F-ионосферы во время геомагнитных бурь. Тем не менее совокупность полученных оптических данных, включая и данные о температуре, требует дополнительных, более детальных исследований некоторых особенностей анализируемой магнитной бури 17 марта 2015 г.

Среди наиболее интересных морфологических особенностей исследуемого сияния, указывающих, в частности, на его нетипичность, можно отметить следующие:

1. Максимальная интенсивность доминирующей эмиссии 630.0 нм (~14 кРл) во время магнитной бури 17 марта 2015 г. позволяет отнести это СС к экстремальным СС, наблюдавшимся в месте расположения ГФО в 1991–2017 гг. По проявлению в эмиссии 630.0 нм анализируемое СС уступает лишь сиянию в период супербури 20 ноября 2003 г. (~19 кРл) и превосходит сияния во время МБ с более сильными геомагнитными возмущениями (по *Dst*-индексу).

2. Отсутствует зависимость эмиссии 630.0 нм от *Dst*-индекса в течение ночи, что является нетипичным для наблюдавшихся ранее в ГФО СС.

3. Присутствуют интенсивные всплески эмиссии 630.0 нм с характерными длительностями ~1 ч, которые более типичны для суббулевой активности в субавроральных и авроральных широтах.

4. В спектре СС, кроме доминирующих авроральных эмиссий 557.7 и 630.0 нм, характерных и для среднеширотного свечения атмосферы, зарегистрированы эмиссия [NI] 520 нм и полоса N_2^+ 586.7 нм.

5. По данным интерферометрических наблюдений в эмиссии 630.0 нм в течение ~3 ч зарегистрировано увеличение доплеровской температуры атомарного кислорода от ~1100–1150 до ~1450–1650 К.

В работе использовались данные оптического комплекса, входящего в состав ЦКП «Ангара», <http://ckp-rf.ru/ckp/3056>. Исследование выполнено в рамках базового финансирования программы ФНИ И.16 и при поддержке программы Президиума РАН № 56 «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белецкий А.Б., Тащилин М.А., Михалев А.В., Татарников А.В. Спектральные измерения собственного излучения ночной атмосферы с помощью спектрографа Shamrock SR-303i // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 192–197.

Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б. и др. Регистрация параметров верхней атмосферы Восточной Сибири при помощи интерферометра Фабри—Перо КЕО Scientific «Arianae» // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3. С. 70–87. DOI: [10.12737/szf-33201707](https://doi.org/10.12737/szf-33201707).

Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (Обзор) // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 5. С. 1–33.

Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Влияние суббури и бури на динамику SAR-дуги. Статистический анализ // Геомагнетизм и аэронавигация. 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.

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. Сезонные и межгодовые вариации атмосферной эмиссии [OI] 630.0 нм по данным наблюдений в регионе Восточной Сибири в 2011–2017 гг. // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 2. С. 96–101. DOI: [10.12737/szf-42201809](https://doi.org/10.12737/szf-42201809).

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, № 01-02. С. 155–159.

Михалев А.В., Подлесный С.В., Стоева П.В. Свечение ночной атмосферы в RGB цветовом представлении // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 74–80. DOI: [10.12737/19040](https://doi.org/10.12737/19040).

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

Подлесный С.В., Михалев А.В. Спектрофотометрия среднеширотных сияний, наблюдаемых в регионе Восточной Сибири во время магнитных бурь 27 февраля 2014 г. и 17 марта 2015 г. // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XIV конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2015. С. 175–177.

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

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

Harding B.J., Gehrels T.W., Makela J.J. Nonlinear regression method for estimating neutral wind and temperature from Fabry–Perot interferometer data // Appl. Opt. 2014. V. 53. P. 666–673. DOI: [10.1364/AO.53.000666](https://doi.org/10.1364/AO.53.000666).

Ievenko I.B., Parnikov S.G. Comparison of the overlap region of energetic plasma and a plasmopause by the Van Allen Probe data with the SAR arcs ground observations during storm and substorm // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: VIII Международная конференция, с. Паратунка, Камчатский край, 25–29 сентября 2017 г.: тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2017. С. 75–76.

Earle G.D., Davidson R.L., Heelis R.A., et al. Low latitude thermospheric responses to magnetic storms // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2013. V. 118. P. 3866–3876. DOI: [10.1002/jgra.50212](https://doi.org/10.1002/jgra.50212).

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Alicia L. Clúa de Gonzalez. Interplanetary origin of geomagnetic storms // Space Sci. Rev. 1999. V. 88, iss. 3–4. P. 529–562.

Kamide Y., Kusano K. No major solar flares but the largest geomagnetic storm in the present solar cycle // Space Weather. 2015. V. 13. P. 365–367. DOI: [10.1002/2015SW001213](https://doi.org/10.1002/2015SW001213).

Rassoul H.K., Rochrbough R.P., Tinsley B.A. Low-latitude particle precipitation and associated local magnetic disturbance // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, N A4. P. 4041–4052.

Rassoul H.K., Rohrbough R.P., Tinsley B.A., Slater D.W. Spectrometric and photometric observations of low-latitude aurorae // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, N. A5. P. 7695–7709.

Rees M.H., Roble R.G. Observations and theory of the formation of stable auroral red arcs // Res. Geophys. 1975. V. 13, № 1. P. 201–242.

Shiokawa K., Otsuka Y., Oyama S., et al. Development of low-cost sky-scanning Fabry–Perot interferometers for airglow and auroral studies // Earth Planet Space. 2012. V. 63, iss. 11. P. 1033–1046. DOI: [10.5047/eps.2012.05.004](https://doi.org/10.5047/eps.2012.05.004).

Zhang Shunrong. Ionospheric observational campaign study of geospace storms: a scenario for strong ionosphere and thermosphere coupling during the 2015 St Patrick's day storm // Second VarSITI General Symposium (VarSITI-2017). Meeting place: Marriot Courtyard City Center, Irkutsk, July 10–15, 2017. VarSITI Abstracts, P. 104.

A.V. Mikhalev, A.B. Beletskiy, P.V. Vasilyev, G.A. Zherebtsov
C.V. Podlesnyy, M.A. Tashchilin, M.F. Artamonov

A.V. Mikhalev, A.B. Beletskiy, P.V. Vasilyev, G.A. Zherebtsov,
S.V. Podlesnyy, M.A. Tashchilin, M.F. Artamonov

URL: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime (дата обращения 12 мая 2018).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/spectr> (дата обращения 12 мая 2018).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/color> (дата обращения 12 мая 2018).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/keo> (дата обращения 12 мая 2018).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 12 мая 2018).

REFERENCES

Beletskiy A.B., Tashchilin M.A., Mikhalev A.V., Tatar-nikov A.V. Spectral measurements of eigen emission of the night atmosphere with Shamrock SR-303i spectrograph. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space]. 2016, vol. 13, iss. 3, pp. 192–197. (In Russian).

Danilov A.D. Response of the F region to geomagnetic disturbances (Review). *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [Heliogeophysical Res.]. 2013, vol. 5, pp. 1–33. (In Russian).

Earle G.D., Davidson R.L., Heelis R.A., Coley W.R., Weimer D.R., Makela J.J., Fisher D.J., Gerrard A.J., Meriwether J. Low latitude thermospheric responses to magnetic storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013, vol. 118, pp. 3866–3876. DOI: [10.1002/jgra.50212](https://doi.org/10.1002/jgra.50212).

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Alicia L. Clúa de Gonzalez. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88, iss. 3–4, pp. 529–562.

Harding B.J., Gehrels T.W., Makela J.J. Nonlinear regression method for estimating neutral wind and temperature from Fabry–Perot interferometer data. *Appl. Opt.* 2014, vol. 53, pp. 666–673. DOI: [10.1364/AO.53.000666](https://doi.org/10.1364/AO.53.000666).

Ievenko I.B., Alekseev V.N. Substorm and storm effect on SAR arc dynamics. Statistical analysis. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2004, vol. 44, no. 5, pp. 643–654. (In Russian).

Ievenko I.B., Parnikov S.G. Comparison of the overlap region of energetic plasma and a plasmopause by the Van Allen Probe data with the SAR arcs ground observations during storm and substorm. *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. VIII International Conference, September 25–29, 2017, Paratunka, Kamchatskii kraj: Abstracts.* 2017. pp. 75–76.

Kamide Y., Kusano K. No major solar flares but the largest geomagnetic storm in the present solar cycle. *Space Weather.* 2015, vol. 13, pp. 365–367. DOI: [10.1002/2015SW001213](https://doi.org/10.1002/2015SW001213).

Khorosheva O.V. Magnetospheric disturbances and dynamics of ionospheric electrojets, auroras, and plasmopause. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1987, vol. XXVII, no. 5, pp. 804–811. (In Russian).

Krakovetsky Yu.K., Loisha V.A., Popov L.N. Chronology of auroras for last millennium. *Solnechnye dannye* [Solar Data]. 1989, no. 5, pp. 110–115. (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. Seasonal and interannual variations in the [OI] 630 nm atmospheric emission as derived from observations over Eastern Siberia in 2011–2017. *Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, iss. 2, pp. 58–62, DOI: [10.12737/stp-42201809](https://doi.org/10.12737/stp-42201809).

Mikhalev A.V., Beletskiy 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., Beletskiy 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., Podlesny S.V., Stoeva P.V. Night airglow in RGB mode. *Solar-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, iss. 3, pp. 106–114. DOI: [10.12737/22289](https://doi.org/10.12737/22289).

Omholt A. *Polyarnye siyaniya* [Auroras]. Moscow, Mir Publ., 1974, 246 p. (In Russian).

Podlesny S.V., Mikhalev A.V. Spectrophotometry of mid-latitude airglows observed in the Eastern Siberia region during magnetic storms on February 27, 2014 and March 17, 2015. *Mezhdunarodnaya Baikalskaya molodezhnaya nauchnaya shkola po fundamentalnoi fizike. XIV Konferentsiya molodykh uchenykh* “Vzaimodeistvie polei i izlucheniya s veshchestvom [Young Scientists’ International School on Fundamental Physics. XV Young Scientists’ Conference “Interaction of Fields and Radiation with Matter”]. Irkutsk, 2015, pp. 175–177. (In Russian).

Rassoul H.K., Rochrbaugh R.P., Tinsley B.A. Low-latitude particle precipitation and associated local magnetic disturbance. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 97, no. A4, pp. 4041–4052.

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, no. A5, pp. 7695–7709.

Rees M.H., Roble R.G. Observations and theory of the formation of stable auroral red arcs. *Res. Geophys.* 1975, vol. 13, no. 1, pp. 201–242.

Shiokawa K., Otsuka Y., Oyama S., Nozawa S., Satoh M., Katoh Y., Hamaguchi Y., Yamamoto Y., Meriwether J. Development of low-cost sky-scanning Fabry–Perot interferometers for airglow and auroral studies. *Earth Planet Space.* 2012, vol. 63, iss. 11, pp. 1033–1046. DOI: [10.5047/eps.2012.05.004](https://doi.org/10.5047/eps.2012.05.004).

Trutse 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).

Vasilyev R.V., Artamonov M.F., Beletskiy A.B., Zherebtsov G.A., Medvedeva I.V., Mikhalev A.V., Syrenova T.E. Registering upper atmosphere parameters in East Siberia with Fabry–Perot Interferometer KEO Scientific “Arinae”. *Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, iss. 3, pp. 61–75. DOI: [10.12737/stp-33201707](https://doi.org/10.12737/stp-33201707).

Zhang Shunrong. Ionospheric observational campaign study of geospace storms: a scenario for strong ionosphere and thermosphere coupling during the 2015 St Patrick’s day storm. *Second VarSITI General Symposium (VarSITI-2017)*. Meeting place: Marriot Courtyard City Center, Irkutsk, July 10–15, 2017. VarSITI Abstracts, p. 104.

URL: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime (accessed May 12, 2018).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/spectr> (accessed May 12, 2018).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/color> (accessed May 12, 2018).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/keo> (accessed May 12, 2018).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (accessed May 12, 2018).

Как цитировать эту статью

Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В., Жеребцов Г.А., Подлесный С.В., Тащилин М.А., Артамонов М.Ф. 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).