

# ОТКЛИК СРЕДНЕШИРОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ НА НАЧАЛЬНУЮ ФАЗУ МАГНИТНЫХ БУРЬ

<sup>1</sup>А.В. Михалев, <sup>1</sup>Л.А. Леонович, <sup>1</sup>Н.В. Костылева, <sup>1</sup>В.А. Леонович, <sup>1</sup>В.В. Мишин, <sup>2</sup>П.В. Стоева

## RESPONSE OF MID-LATITUDE AIRGLOW TO THE INITIAL PHASE OF MAGNETIC STORMS

<sup>1</sup>A.V. Mikhalev, <sup>1</sup>L.A. Leonovich, <sup>1</sup>N.V. Kostyleva, <sup>1</sup>V.A. Leonovich, <sup>1</sup>V.V. Mishin, <sup>2</sup>P.V. Stoeva

Исследуется отклик среднеширотных атмосферных эмиссий атомарного кислорода 557.7 и 630 нм на начальную фазу магнитных бурь. Выделены события, для которых достаточно надежно выделяются возмущения в эмиссии 630 нм в начальную фазу магнитных бурь. Отмечается корреляция с вариациями  $D_{st}$ -индекса и геомагнитного поля. Обсуждаются возможные источники возмущений атмосферных эмиссий.

We examine the response of mid-latitude 557.7 and 630 nm atomic oxygen airglow to the initial phase of magnetic storms. Presented here are the magnetic storms whose initial phase is characterized by a rather reliable detection of 630 nm emission disturbances. Correlation with the  $D_{st}$  index and geomagnetic field is observed. Possible sources of disturbances atmospheric emissions are discussed.

### Введение

С фазами геомагнитных бурь (ГБ) связывают последовательность явлений и процессов в магнитосфере, ионосфере и нейтральной атмосфере Земли, которые проявляются в вариациях и возмущениях многих параметров, среди которых можно отметить в первую очередь  $D_{st}$ -вариации геомагнитного поля, развитие геомагнитных пульсаций [Соловьев и др., 2005], высыпание частиц на высоких широтах [Nielsen, Honary, 2000], изменения в магнитосферно-ионосферных токовых системах [Tinsley et al., 1986], нагрев ионосферной плазмы [Деминев, Кузнецов, 2008] и др. В средних широтах большие магнитные бури находят свое проявление и в возмущении собственного излучения верхней атмосферы в виде среднеширотных сияний и SAR-дуг [Rassoul et al., 1993; Михалев, 2001; Алексеев, Иевенко, 2008], которые, в большинстве случаев, соответствуют главной фазе и фазе восстановления ГБ соответственно. Вероятно, в силу того, что уровень возмущений собственного излучения верхней атмосферы на этих фазах ГБ достаточно высок, среднеширотные сияния и SAR-дуги хорошо исследованы. Что касается возможных вариаций и возмущений собственного излучения верхней атмосферы в периоды внезапных начал (SSC – sudden storm commencement) и начальной фазы ГБ, можно отметить, что специально этим вопросам посвящены только единичные публикации (см., например, [Shiokawa et al., 2005; Mikhalev et al., 2008]).

В настоящей работе на основе многолетних наблюдений в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН (52° N, 103° E) проводятся исследования вариаций эмиссий атомарного кислорода 557.7 и 630 нм в начальную фазу ГБ. Особенность среднеширотной ГФО обусловлена достаточной близостью по широте к субавроральной зоне. Это приводит к тому, что в некоторые интервалы наблюдений в ГФО по оптическим данным отмечаются элементы субавроральной ионосферы, а в периоды экстремальных бурь – элементы авроральной ионосферы [Михалев и др., 2004].

### Аппаратура и методика наблюдений

В работе были использованы данные наблюдений

интенсивности эмиссий атомарного кислорода 557.7 и 630.0 нм, полученные при помощи зенитного фотометра «Феникс» в ГФО в 1997–2010 гг. Эмиссионные линии выделялись при помощи интерференционных качающихся светофильтров ( $\Delta\lambda_{1/2} \sim 1\text{--}2$  нм). Угловое поле зрения каналов фотометра составляло  $\sim 4\text{--}5^\circ$ . Абсолютная калибровка измерительных трактов аппаратуры осуществлялась в отдельные периоды по эталонным звездам и впоследствии контролировалась с помощью калибраторов – стабилизированных источников света. Более подробное описание аппаратуры и методики наблюдений можно найти в [Михалев, 2001; Михалев и др., 2004; Mikhalev et al., 2008].

### Результаты наблюдений и обсуждение

За анализируемый период было рассмотрено около 30 ГБ, для которых имелись оптические данные, приходящиеся на периоды SSC и начальную фазу ГБ. Для окончательного анализа было выбрано девять событий, в которых SSC и начальная фаза ГБ приходились на часы наблюдений в течение одной ночи. Последнее условие в большей мере позволяло устранить возможные возмущения от других источников возмущений рассматриваемых атмосферных эмиссий.

В таблице приведены характеристики анализируемых ГБ и отмеченные возмущения в эмиссии 630 нм. Выбор эмиссии 630 нм обусловлен высотной локализацией эмиссионного слоя, соответствующей F2-слою, и высокой чувствительностью этой эмиссии к геомагнитным возмущениям. В таблице указаны  $K_{p \max}$  и  $D_{st \min}$  – максимальное и минимальное значения  $K_p$ - и  $D_{st}$ -индексов рассматриваемой ГБ;  $\Delta D_{st}$  и  $\Delta I_{630}$  – характерные изменения  $D_{st}$ -индекса и интенсивности эмиссии 630 нм в период начальной фазы ГБ.

Анализ рассмотренных девяти буревых событий показал, что квазиволновые возмущения эмиссии 630 нм с достаточно большой амплитудой наиболее выражены в двух ГБ: 6 апреля 2000 и 21 октября 2001 г. Увеличения интенсивности эмиссии 630 нм для этих ГБ наступает непосредственно после SSC с минимальной задержкой в несколько минут.

Эти события соответствуют наиболее сильным из рассмотренных ГБ, которые характеризуются минимальной длительностью начальной фазы ГБ. В осталь-

№	Дата	$K_{p \max}$	$D_{st \min}$	$\Delta D_{st}$ , нТл	$\Delta I_{630}$ , Рл
1	2000.04.06	9–	–288 нТл	19	75
2	2001.10.21	8–	–184 нТл	11	25
3	2006.12.14	8+	–162 нТл	38	43
4	2005.01.21	8 <sub>0</sub>	–97 нТл	45	175
5	1999.12.12	6–	–85 нТл	8	7
6	2000.01.11	5+	–81 нТл	11	7
7	2000.11.26	6+	–80 нТл	35	30
8	2000.12.22	6–	–62 нТл	15	10
9	2000.01.27	5 <sub>0</sub>	–41 нТл	50	100

ных рассматриваемых случаях наблюдаемые возмущения эмиссии 630 нм в пределах начальных фаз ГБ отмечаются с существенной задержкой ( $\geq 1$  ч) относительно SSC. В этих случаях изменение хода красной кислородной линии (по форме волнообразности и/или амплитуде) выражено в меньшей степени, хотя общий уровень увеличения интенсивности относительно фоновых значений за весь период начальных фаз ГБ в отдельных случаях (ГБ 21 января 2005 и 27 января 2000 г.) превышает уровень возмущения эмиссии 630 нм для наиболее сильных ГБ (6 апреля 2000 и 21 октября 2001 г.).

На рис. 1 приведены примеры возмущений интенсивностей эмиссий 557.7 и 630 нм в начальную фазу для двух ГБ: 6 апреля 2000 (а) и 21 октября 2001 г. (б).

Следует отметить, что аналогичные возмущения эмиссии 630 нм в начальную фазу этих же бурь рассматривались и в работе [Shiokawa et al., 2005].

В отдельных ГБ (6 апреля 2000, 21 октября 2001, 21 января 2005 г.) одновременно с возмущением эмиссии 630 нм отмечаются хорошо коррелированные с ней возмущения эмиссии 557.7 нм (см. рис. 1). Особый интерес представляет поведение эмиссии 557.7 нм на начальной фазе ГБ 21 января 2005 г., когда непосредственно после SSC отмечались короткопериодические вариации этой эмиссии. На рис. 2 приведены вариации  $H$ -компоненты геомагнитного поля (ст. Иркутск) и интенсивностей эмиссий 557.7 и 630 нм для ГБ 21 января 2005 г. в интервале времени 16–19 UT. Детально механизм возмущения эмиссии 557.7 нм на начальной фазе ГБ в настоящее время неясен, но, вероятно, он связан с высыпанием высокоэнергичных частиц.

Было проведено сопоставление амплитуд вариаций эмиссии 630 нм и  $D_{st}$ -индекса в течение начальных фаз рассматриваемых ГБ. Результаты сопоставления приведены на рис. 3. Приведенная линия регрессии описывается уравнением вида  $\ln(\Delta I_{630}) = 0.058(\Delta D_{st}) + 1.89$  с коэффициентом корреляции между рассматриваемыми величинами  $\sim 0.74$ . Зависимость  $I_{630}$  от величины  $D_{st}$ -индекса установлена достаточно давно и исследовалась во многих работах (см., например, [Tinsley et al., 1986; Михалев и др., 2004; Трутце, 1973; Rassoul et al., 1992]). Но в основном эти результаты относятся к главной фазе ГБ или, по крайней мере, в них отдельно не выделяется и не рассматривается начальная фаза ГБ.

В связи с приведенным выше уравнением связи между  $\Delta I_{630}$  и  $\Delta D_{st}$  интересно рассмотреть аналогич-

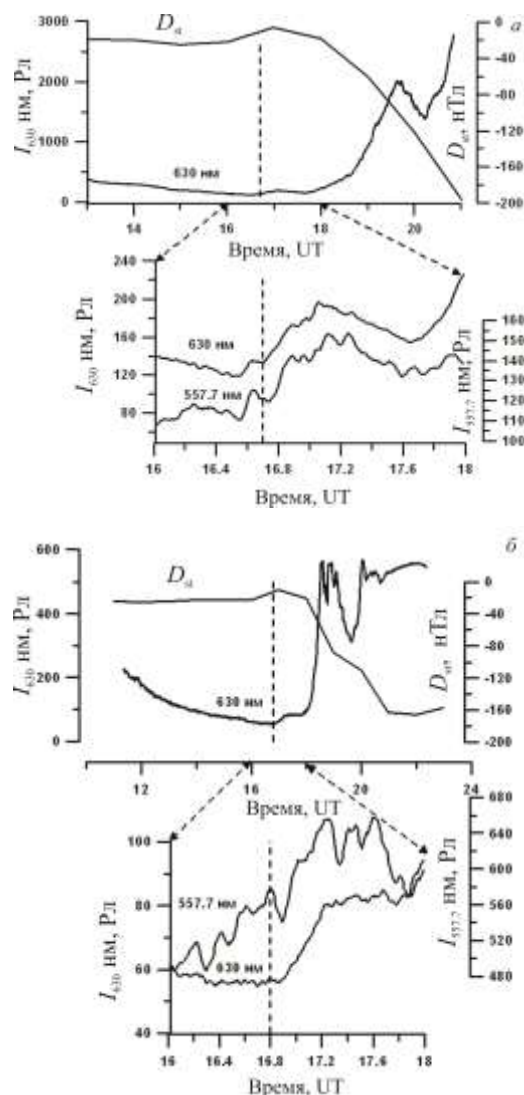


Рис. 1. Вариации интенсивностей эмиссии 630 нм на начальных фазах ГБ 6 апреля 2000 (а) и 21 октября 2001 г. (б). Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты SSC.

ные соотношения в других работах. Например, в работе [Трутце, 1973] эта связь имеет вид  $\lg I_{630} = \beta D_{st} + G$ , где  $\beta$  и  $G$  – некоторые коэффициенты, зависящие от геомагнитной широты и уровня солнечной активности. А в работе [Rassoul et al., 1992] предлагается параметр  $J = D_{st} \Delta H$ , где  $\Delta H$  – разность между максимумом и минимумом горизонтальной компоненты магнитного поля, измеренного в месте проведения оптических наблюдений на интервале

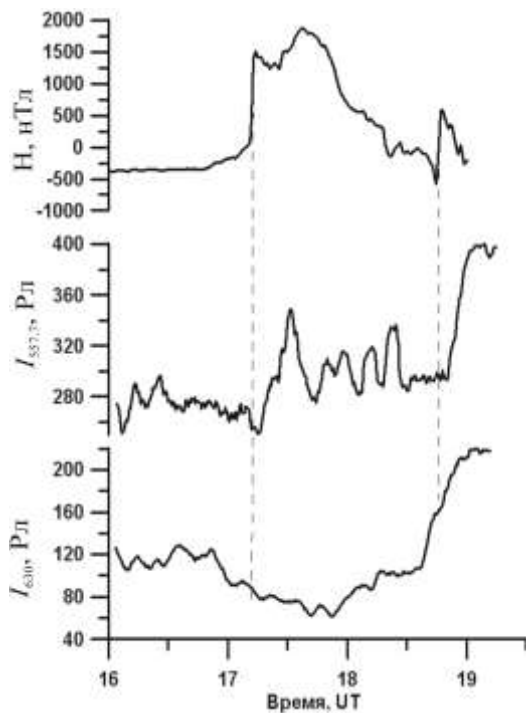


Рис. 2. Вариации  $H$ -компоненты геомагнитного поля и интенсивностей эмиссий 557.7 и 630 нм для магнитной бури 21 января 2005 г. в интервале времени 16–19 UT.

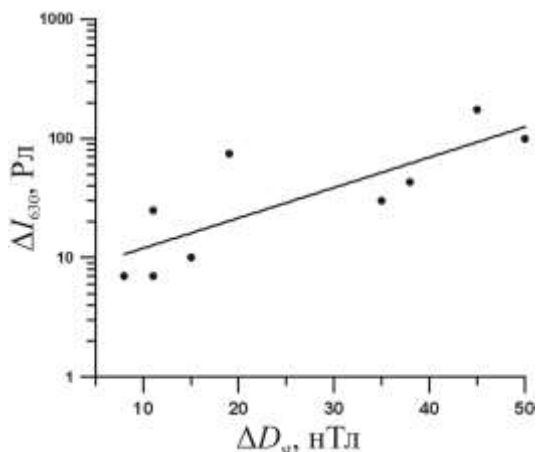


Рис. 3. Зависимость величины  $\Delta I_{630}$  от вариаций  $\Delta D_{st}$  в начальные фазы магнитных бурь.

1 ч. Авторы работы [Rassoul et al., 1992] утверждают, что этот параметр  $I$  с лучшим временным разрешением коррелирует с вариациями атмосферных эмиссий. Действительно, во многих случаях можно найти корреляцию вариаций эмиссии 630 нм с вариациями геомагнитного поля  $H$  во время геомагнитных возмущений.

В литературе при рассмотрении средне- и низкоширотных сияний рассматривается несколько механизмов возбуждения эмиссий во время ГБ. Среди этих механизмов можно отметить высыпания тяжелых частиц (ионов и нейтральных атомов) из области кольцевого тока, столкновения с потоками низкоэнергичных электронов и другие [Cole, 1970; Фишкова, Марцваладзе, 1985; Tinsley et al., 1986; Rassoul et al., 1993]. Это позволило авторам работы [Rassoul et al., 1993] выделить несколько типов средне- и низкоширотных сияний. Высыпающиеся

из кольцевого тока тяжелые частицы с энергиями 1–100 кэВ при перезарядке вызывают низко- и среднеширотные сияния на геомагнитных широтах  $\leq 40^\circ$  (нейтралы) и  $\geq 40^\circ$  (ионы). Потоки электронов с энергиями  $\leq 10$  эВ вызывают явление SAR-дуг, а электроны с энергиями  $\sim 10$ –1000 эВ приводят к среднеширотным сияниям d-типа с доминирующей эмиссией 630 нм. Для этих двух типов среднеширотных сияний область локализации источников электронов связывают с областью плазмопаузы. При этом особо следует отметить, что сияния d-типа наблюдаются в главную фазу ГБ, а SAR-дуги – преимущественно на фазе восстановления. Во время фазы восстановления ГБ возможны также возмущения эмиссий 557.7 и 630 нм, обусловленные вертикальными движениями F2-слоя [Barbier, 1959; Леонovich и др., 2011].

Если говорить об атмосферной эмиссии 630 нм (переход  ${}^1D \rightarrow {}^3P$ ), то основными источниками  $O({}^1D)$  в верхней атмосфере являются реакции диссоциативной рекомбинации ионов  $NO^+$  и  $O_2^+$  с электронами и возбуждение атомарного кислорода при неупругих соударениях с электронами тепловых и сверхтепловых энергий. При этом в спокойных геомагнитных условиях определяющим процессом образования  $O({}^1D)$  является диссоциативная рекомбинация в реакции  $O_2^+ + e \rightarrow O({}^1D, {}^1S) + O$ .

Конкретный механизм возбуждения атмосферных эмиссий во время начальной фазы ГБ, вероятно, может быть подобен механизмам возбуждения эмиссий во время главной фазы, которые связывают с усилением кольцевого тока и нагрева ионосферы, или механизмам образования SAR-дуг [Rassoul et al., 1993]. Например, в работе [Shiokawa et al., 2005] высказывается предположение, что частицы кольцевого тока и плазмосферы, возможно, взаимодействуют друг с другом на начальной стадии ГБ и могут проникать глубоко во внутреннюю плазмосферу (до  $L \sim 2$ ) в пределах двух часов после SSC. Не следует исключать и сценарий усиления эмиссий 557.7 и 630 нм, связанный с импульсом давления солнечного ветра на магнитосферу в качестве первичного источника возмущений [Shiokawa et al., 2005].

Важно, что во многих вариантах сценариев возбуждения атмосферных эмиссий во время геомагнитных возмущений подразумевается поступление энергии из магнитосферы в ионосферу. Например, согласно [Деминов, Кузнецов, 2008], кольцевой ток является источником нагрева окружающей плазмы внешней плазмосферы. В силу высокой теплопроводности электронов вдоль геомагнитного поля может осуществляться передача энергии по замкнутым силовым линиям на ионосферные высоты, увеличение температуры электронов ионосферы, которое, в свою очередь, может вносить существенный вклад в энергетику, изменение состава и перераспределение плазмы на высотах ионосферы [Деминов, Кузнецов, 2008], а также возмущение атмосферных эмиссий. При этом возможно существенное перераспределение каналов возбуждения эмиссии 630 нм. Так, например, согласно некоторым работам, как для случая SAR-дуг [Фаткуллин,

1978], так и для возмущения эмиссии 630 нм в главной фазе ГБ [Гогошева, 1970], электроны, нагретые за счет прихода тепла – высвобождения энергичных частиц (электронов или протонов), – вследствие питч-угловой диффузии, вызванной развитием плазменных неустойчивостей в области контакта горячей плазмы кольцевого тока и холодной плазмы внешней плазмосферы, кроме возбуждения уровня  $O(^1D)$ , служат также источником возбуждения колебательных уровней молекул  $N_2$ . Последнее сопровождается усилением скорости протекания реакции  $O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N(^2D)$ , которая существенно зависит от колебательной температуры  $N_2$ . А уже дополнительно образованные атомы  $N(^2D)$  могут являться источником образования  $O(^1D)$  в реакциях  $N(^2D) + O(^3P) \rightarrow N(^4S) + O(^1D)$  и  $N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O(^1D)$ .

Наличие связи  $\Delta I_{630}$  с вариациями  $D_{st}$  и  $H$  во время начальной фазы ГБ может указывать на то, что токовые магнитосферно-ионосферные системы являются местом локализации источника возмущений рассматриваемых эмиссий. В работе [Cole, 1970] автор предположил, что эмиссия 630 нм возбуждается за счет электронов, получивших энергию из магнитосферных источников. Считают, что  $D_{st}$ -вариации обусловлены тремя источниками: изменениями кольцевого тока, токов на магнитопаузе и в хвосте магнитосферы. Динамическое давление солнечного ветра оказывает влияние на развитие бури: его увеличение приводит к «поджатию» дневной магнитопаузы к Земле, усилению токов на магнитопаузе и в хвосте магнитосферы [Maltsev, 2004] и усилению геомагнитной активности.

Имеющиеся экспериментальные данные в настоящее время не позволяют более конкретно указать место локализации источника возмущений атмосферных эмиссий в магнитосфере и требуют дополнительных исследований, возможно, с привлечением моделирования процессов поступления энергии из магнитосферы в ионосферу от различных отмеченных выше токовых источников. Тем не менее, проведенные исследования позволяют сформулировать некоторые предварительные выводы.

## Выводы

1. Анализ наблюдаемых возмущений атмосферной эмиссии 630 нм позволяет интерпретировать их как возможный отклик на начальную фазу ГБ. В двух событиях 6 апреля 2000 и 21 октября 2001 г. хорошо выделяемое увеличение интенсивности эмиссии 630 нм наступает непосредственно после SSC с минимальной задержкой в несколько минут. Эти события соответствуют наиболее сильным ГБ. В остальных рассматриваемых случаях наблюдаемые возмущения эмиссии 630 нм в пределах начальных фаз ГБ отмечаются с существенной задержкой ( $\geq 1$  ч) относительно SSC.

2. В начальные фазы отдельных ГБ возмущения эмиссии 630 нм коррелируют с возмущениями эмиссии 557.7 нм и вариациями геомагнитного поля  $H$ .

3. Рассмотрение характерных амплитуд возмущений интенсивностей эмиссии 630 нм и изменений величин  $D_{st}$  в пределах начальных фаз ГБ позволило установить зависимость  $\Delta I_{630}$  от  $\Delta D_{st}$ , подобную зависимости  $I_{630}$  от  $D_{st}$  в главные фазы ГБ.

4. Наличие связи  $\Delta I_{630}$  с вариациями  $D_{st}$  и  $H$  в начальные фазы ГБ может являться косвенным указанием на токовые магнитосферно-ионосферные системы как возможное местоположение источника возбуждения рассматриваемых эмиссий.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 12-05-00024-а и проекта «АТМОС» Соглашения между Российской и Болгарской академиями наук в области фундаментальных космических исследований и при финансировании Минобрнауки (соглашение № 8388).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.Н., Иевенко И.Б. Частота наблюдений SAR-дуг в течение 23-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 4. С. 465–468.
- Гогошева Ц. Вклад  $N(2D)$  в возбуждение красной кислородной эмиссии // Бюл. геофиз. списание, 1970. Т. 5, № 1. С. 33–35.
- Деминов М.Г., Кузнецов В.Д. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Ионосферная плазма. Ч. II. Магнитосфера / под ред. В.Д. Кузнецова и Ю.Я. Ружина. М.: ЯНУС-К, 2008. С. 22–35.
- Леонович Л.А., Михалев А.В., Леонович В.А. Возмущение свечения ночной верхней атмосферы во время геомагнитной бури 15 декабря 2006 г. над регионом Восточной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 698–702.
- Михалев А.В. Некоторые особенности наблюдений среднеширотных сияний и возмущений эмиссий верхней атмосферы во время магнитных бурь в регионе Восточной Сибири // Там же. 2001. Т. 14, № 10. С. 970–973.
- 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.
- Соловьев С.И., Борова Р.Н., Баишев Д.Г. и др. Развитие суббуревых и низкоширотных геомагнитных возмущений в периоды супермагнитных бурь 29, 30 октября 2003 г. и 20 ноября 2003 г. // Солнечно-земная физика. 2005. Вып. 8. С. 132–134.
- Трутце Ю.Л. Верхняя атмосфера во время геомагнитных возмущений // Полярные сияния и свечения ночного неба. М.: Наука, 1973. № 20. С. 5–22.
- Фаткуллин М.Н. Ионосферные возмущения. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы / под ред. Н.П. Бенькова. М. ВИНТИ, 1978. Т. 4. С. 5–107.
- Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М. О поведении эмиссий  $HI$  656.3 нм и  $[OI]$  630 нм верхней атмосферы во время магнитных бурь с внезапным началом // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25, № 3. С. 509–511.
- Barbier D. Recherches sur la raie 6300 de la luminescence atmosphérique nocturne // Ann. Geophys. 1959. V.15, N 2. P. 179–217.
- Cole K.D. Magnetospheric processes leading to mid-latitude aurora // Ibid. 1970. V. 26, N 1. P. 187–193.
- Maltsev Y.P. Points of controversy in the study of magnetic storms // Space Sci. Rev. 2004. V. 110. P. 227–267.
- Mikhalev A.V., Jiyao Xu, Degtyarev V.I., Wei Yuan. Initial phase of mid-latitude aurora during strong geomagnetic storms // Adv. in Space Res. 2008. V. 42. P. 992–998. doi:10.1016/j.asr.2007.11.025.
- Nielsen E., Honary F. Observations of ionospheric flows and particle precipitation following a sudden commencement // Ann. Geophys. 2000. V. 18. P. 908–917.
- 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., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A., Slater D.W. Spectrometric and photometric observations of low-latitude aurorae // Ibid. V. 98, N A5. P. 7695–7709.

Shiokawa K., Ogawa T., Kamide Y. Low-latitude auroras observed in Japan: 1999–2004 // Ibid. 2005. V. 110, A05202. doi:10.1029/2004JA010706.

Tinsley B.A., Rohrbaugh R.P., Rassoul H., et al. Low-latitude aurorae and storm time current systems // Ibid. 1986. V. A91, N 10. P. 11257–11269.

<sup>1</sup>*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт космических исследований и технологий БАН, Стара Загора, Болгария*