

ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ АТМОСФЕРНОЙ ЭМИССИИ 557.7 нм

А.В. Михалев

VARIABILITY OF THE 557.7 nm ATMOSPHERIC EMISSION

A.V. Mikhalev

Рассматривается изменчивость внутрисуточных, средних за ночь и среднемесячных значений интенсивности атмосферной эмиссии 557.7 нм ($I_{557.7}$). Используются данные наблюдений свечения верхней атмосферы Земли в регионе Восточной Сибири (52° N, 103° E) за период 1997–2010 гг. В качестве индекса изменчивости рассматривается коэффициент вариации K_V соответствующих величин. Для 23-го солнечного цикла получены и обсуждаются сезонный ход K_V среднемесячных $I_{557.7}$, зависимость от солнечной активности среднемесячных значений $I_{557.7}$ для каждого месяца, коэффициент вариаций суточных значений $I_{557.7}$ для различных сезонов года, изменчивость $I_{557.7}$ во время некоторых геофизических явлений, корреляция вариаций $I_{557.7}$ с глобальными климатическими индексами.

The variability of diurnal, day-to-day and monthly average values of the 557.7 nm atmospheric emission intensity ($I_{557.7}$) is analysed. The analysis rests on airglow observations obtained in Eastern Siberia (52° N, 103° E) over 1997–2010. The variation coefficient K_V of corresponding values is taken as the variability index. This paper examines results obtained for the solar cycle 23: namely, the seasonal K_V variation in monthly averaged $I_{557.7}$, the dependence of monthly averaged $I_{557.7}$ for each month on solar activity, the variation coefficient of diurnal $I_{557.7}$ for different seasons, the $I_{557.7}$ variability during some geophysical phenomena, and the correlation of $I_{557.7}$ variations with global climatic indexes.

Введение

Собственное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли характеризуется совокупностью атомарных и молекулярных эмиссий и континуумом. Эмиссия атомарного кислорода 557.7 нм является одной из ярких дискретных эмиссий в ночном излучении верхней атмосферы. Эта эмиссия образуется на высотах мезосфери – нижней термосфери и подвержена регулярным и нерегулярным вариациям различных временных масштабов [Шефов и др., 2006]. Выделяются внутрисуточные, межсуточные, сезонные, межгодовые и многолетние вариации интенсивности эмиссии 557.7 нм ($I_{557.7}$), которые отражают проявления различных процессов, явлений и возмущений различной природы на высотах высыпивания этой эмиссии. В настоящее время выявлены такие причины изменчивости $I_{557.7}$, как солнечная и геомагнитная активность, внутренние гравитационные волны, вызванные стратосферными потеплениями, сейсмическая и метеорная активность, искусственные воздействия и другие факторы. Несмотря на то, что не все механизмы оптического проявления указанных явлений и процессов до конца изучены, вариабельность эмиссий и их особенности могут служить характеристикой устойчивости или восприимчивости атмосферной системы к геофизическим возмущениям различной природы, а их межгодовые вариации отражать долговременные или климатические изменения атмосферы.

В настоящей работе рассматривается изменчивость внутрисуточных, средних за ночь и среднемесячных значений $I_{557.7}$.

Аппаратура и данные наблюдений

Использовались данные экспериментальных наблюдений эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм, полученные в Геофизической обсерватории (ГО) ИСЗФ СО РАН (52° N, 103° E) с августа 1997 по апрель 2010 г. (23-й солнечный цикл). Измерения собственного оптического излучения верхней атмосферы проводились с помощью 4-канального зенит-

ного фотометра с выделением линий атомарного кислорода [OI] 557.7 и 630 нм, а также ультрафиолетовой (360–410 нм) и ближней инфракрасной (720–830 нм) областей спектра. Эмиссионные линии 557.7 и 630 нм выделялись интерференционными катающимися светофильтрами ($\Delta\lambda_{1/2} \sim 1\text{--}2$ нм), спектральные диапазоны 360–410 и 720–830 нм – абсорбционными светофильтрами. Угловые поля зрения каналов фотометра составляли $4\text{--}5^{\circ}$. Абсолютная калибровка измерительных трактов аппарата осуществлялась в отдельные периоды по эталонным звездам и впоследствии контролировалась с помощью опорных световых источников. Программное обеспечение фотометра позволяло записывать данные фотометрических каналов с усреднением ~ 12 с. Среднеквадратичная погрешность измерений, полученная по измерениям сигналов калибраторов, оценивается величиной $\sim 1\%$.

В качестве меры вариабельности $I_{557.7}$ рассматривается коэффициент вариации K_V соответствующих величин, определяемый как отношение дисперсии к среднему за интервал значению.

Результаты наблюдений и обсуждение

Внутрисуточные вариации. Внутрисуточные вариации $I_{557.7}$ обусловлены регулярным ночных ходом этой эмиссии и наложенным на него нерегулярными вариациями, обусловленными прохождением внутренних гравитационных волн (ВГВ), турбулентностью, сопровождающейся восходящими и нисходящими потоками, общей циркуляцией атмосферы, вариациями температуры и другими процессами [Красовский и др., 1986]. По данным измерений на различных среднеширотных станциях найдено, что в течение ночи имеется максимум, положение которого во времени меняется в течение года [Шефов и др., 2006]. Считается, что такой характер ночных ходов $I_{557.7}$ связан с зависимостью от высоты излучающего слоя фазы солнечного термического полусуточного прилива, обусловливающего харак-

тер ночных изменений [Petitdidier, Teitelbaum, 1977]. В связи с существованием нерегулярных вариаций ночной максимум в суточном ходе $I_{557.7}$ удается выделить только путем усреднения. Характерный масштаб усреднения, позволяющий достаточно надежно выделить ночной максимум, составляет не сколько дней. На рис. 1 для примера приведены данные ночной ход $I_{557.7}$ для семи ночей в феврале 2007 г. и средний ночной ход за эти ночи по данным ГО ИСЗФ СО РАН.

Согласно многолетним наблюдениям в Абастуманской обсерватории, средний разброс $I_{557.7}$ в течение ночи или разброс средних за ночь интенсивностей в течение года может превышать 30 % [Фишкова, 1983]. Отдельные значения интенсивности могут превышать средний ход почти в два раза.

Среднее значение коэффициента вариаций $I_{557.7}$ в течение ночи по данным ГО за период август 1997 – апрель 2010 гг. (1170 ночей) составило величину ~0.26. На рис. 2 приведена гистограмма распределения коэффициента вариаций $I_{557.7}$ для указанного периода. Видно, что наибольшая часть значений K_V заключена в интервале 0.1–0.3.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов ночных вариаций $I_{557.7}$ в периоды действия некоторых геофизических событий. Использовались результаты исследований геофизических событий, во

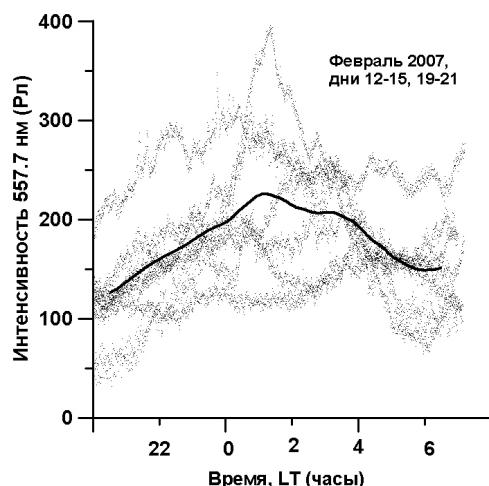


Рис. 1. Ночной ход $I_{557.7}$ в феврале 2007 г. Точки – измерения для 7 ночей: 12–15 и 19–21 февраля. Жирная линия – среднее значение для указанных дней.

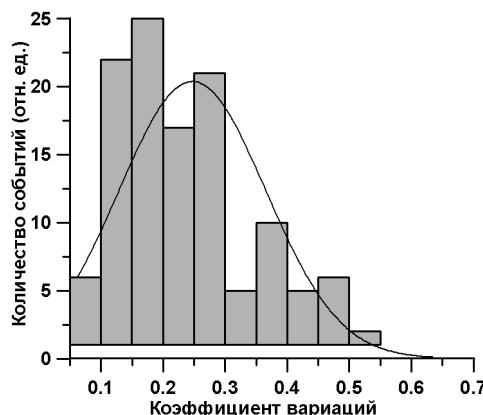


Рис. 2. Гистограмма распределения коэффициента суточных (ночных) вариаций $I_{557.7}$.

время которых отмечались нерегулярные вариации $I_{557.7}$ в диапазоне периодов ВГВ, – во время внезапных зимних стратосферных потеплений [Михалев и др., 2007], землетрясений [Mikhailov et al., 2001], прохождения метеорного потока [Beletsky et al., 2004] и больших геомагнитных бурь, во время которых отмечались высывающиеся потоки энергичных частиц [Михалев и др., 2005].

Таблица 1

Коэффициенты вариации эмиссии 557.7 нм (K_B)

| Среднее за весь период наблюдений (1997–2010 гг., 1170 ночей) | Стратосферные потепления (2 события, среднее за 24 ночи) | Землетрясения (2 события, среднее за 10 ночей) | Максимум метеорного потока 18 ноября 2001 г. | Большие магнитные бури (4 бури, среднее за 4 ночи) |
|---|--|--|--|--|
| 0.26 | 0.2 | 0.165 | 0.15 | 0.75 |

Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что значения коэффициентов вариаций $I_{557.7}$ в периоды действия большинства рассмотренных геофизических событий не превышают средние значения коэффициентов вариации за весь период наблюдений. Полученные результаты можно объяснить тем, что коэффициент ночных вариаций $I_{557.7}$ определяется как регулярным ночным ходом $I_{557.7}$ с достаточно большой амплитудой, так и нерегулярными вариациями этой эмиссии с меньшими периодами ВГВ. Вероятно, в этом случае вклад регулярного ночного хода эмиссии 557.7 нм в интегральный коэффициент вариаций является определяющим. Исключение составляют большие геомагнитные бури, что, вероятно, связано с другим механизмом возмущений эмиссии 557.7 нм.

Межсуточные вариации

Определенный интерес представляет вариабельность $I_{557.7}$ на больших временных масштабах (межсуточные, сезонные вариации) как, например, возможный результат проявления динамики нижележащей атмосферы или солнечной активности.

В связи с этим были определены коэффициенты вариаций средних ночных (суточных) $I_{557.7}$ ($I_{557.7}^c$) для различных сезонов года для периода 1997–2008 гг. (табл. 2 и рис. 3). В табл. 2 для сравнения приведены и средние значения коэффициентов вариаций для четырех стратосферных потеплений в январе, феврале 1998, декабре 2001, декабре 2006 и январе, феврале 2008.

Таблица 2

Коэффициенты межсуточных вариаций средних ночных интенсивностей эмиссии 557.7 нм (K_V) – минимальные, средние и максимальные значения

| | Январь, февраль | Март, апрель | Май–август | Сентябрь, октябрь | Ноябрь, декабрь | Стратосферные потепления |
|-------|-----------------|--------------|------------|-------------------|-----------------|--------------------------|
| Мин. | 0.23 | 0.4 | 0.32 | 0.22 | 0.23 | 0.26 |
| Сред. | 0.39 | 0.55 | 0.47 | 0.39 | 0.51 | 0.43 |
| Макс. | 0.66 | 0.73 | 0.61 | 0.59 | 0.72 | 0.52 |

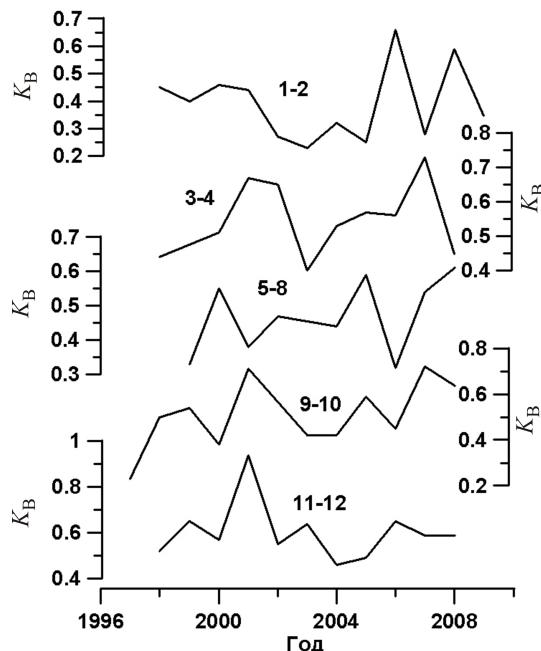


Рис. 3. Коэффициенты вариаций K_V суточных значений $I_{557.7}$ для различных сезонов года. Цифрами над кривыми обозначены месяцы, для которых определялись коэффициенты вариаций.

Для всех сезонов отмечаются небольшие максимумы в 2000, 2001 гг. (максимум солнечной активности), последующее снижение в 2002–2004 гг. и тенденция увеличения коэффициента вариаций суточных значений $I_{557.7}$ в 2004–2008 гг.

Полученные коэффициенты вариаций $I_{557.7}$ для отдельных сезонов года или отдельных лет количественно совпадают с данными работы [Фишкова, 1983], в которой определялись коэффициенты вариаций $I_{557.7}$, характеризующие разброс средних за ночь интенсивностей относительно регулярного сезонного хода (~0.31 летом и ~0.35 зимой, отдельные значения $I_{557.7}$ могут превышать средний ночной ход почти в два раза). Повышенные значения коэффициентов вариаций $I_{557.7}$ в марте, апреле (период перестройки циркуляции атмосферы) и в ноябре, декабре (период усиления волновой активности в атмосфере) предварительно могут тоже быть интерпретированы особенностями 23-го солнечного цикла или особенностями региона наблюдений.

Значения коэффициентов межсуточных вариаций $I_{557.7}$ могут отражать существование на высотах высвечивания эмиссии 557.7 нм волновых возмущений с периодами планетарных волн (~2–30 сут), перестройку циркуляции атмосферы в весенний и осенний периоды и другие процессы.

Вопрос о причинах увеличения коэффициентов вариаций суточных значений $I_{557.7}$ на спаде солнечной активности в 2004–2008 гг. в настоящее время остается открытым и требует дополнительного рассмотрения.

Был также построен сезонный ход коэффициента вариаций среднемесячной интенсивности $I_{557.7}$ за период с августа 1997 по апрель 2010 г. по данным ГО ИСЗФ СО РАН (рис. 4).

Найдено, что наибольшие коэффициенты вариаций среднемесячных значений $I_{557.7}$ приходятся на зимние

месяцы ($K_V \sim 0.64$ –0.9, максимальное значение в декабре – 0.9), наименьшие – в мае–июле ($K_V \sim 0.32$ –0.45) и октябре ($K_V \sim 0.44$). Среднее значение коэффициента вариаций $I_{557.7}$ составило величину 0.56.

В связи с тем, что использовались данные, охватывающие весь 23-й солнечный цикл, включающий фазы минимума и максимума солнечной активности, в значения коэффициентов вариаций $I_{557.7}$ могла вносить вклад и зависимость интенсивности от солнечной активности [Шефов и др., 2006]. В связи с этим, используя данные за период 1997–2008 гг., для каждого месяца года были определены зависимости $I_{557.7}$ от уровня солнечной активности (индекс $F_{10.7}$). На рис. 5 приведены коэффициенты корреляций между $I_{557.7}$ и индексом $F_{10.7}$ по данным ГО ИСЗФ СО РАН и для сравнения по данным работы [Фишкова и др., 2001] за период 1957–1992 гг. Несмотря на количественное совпадение коэффициентов корреляций между среднемесячными значениями $I_{557.7}$ и индексом $F_{10.7}$ для отдельных месяцев, сезонный ход зависимостей $I_{557.7}$ от уровня солнечной активности для каждой из сравниваемых станций имеет свои особенности.

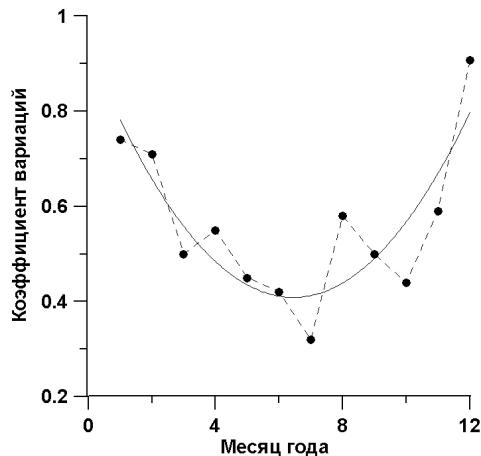


Рис. 4. Коэффициенты вариаций $I_{557.7}$ по данным ГО ИСЗФ СО РАН в 23-м солнечном цикле. На рисунке точками обозначены экспериментальные значения, сплошной линией – интерполяция экспериментальных данных полиномом 2-й степени.

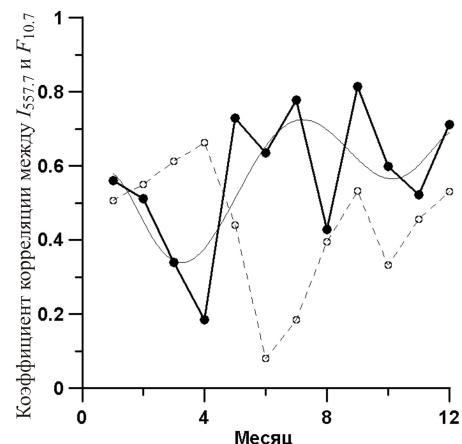


Рис. 5. Коэффициенты корреляции между $I_{557.7}$ и индексом $F_{10.7}$ по данным ГО ИСЗФ СО РАН (темные кружки и толстая сплошная линия – экспериментальные значения, тонкая сплошная линия – интерполяция экспериментальных данных полиномом 6-й степени) в 23-м солнечном цикле и по данным работы [Фишкова и др. 2001] за период 1957–1992 гг. (светлые кружки и тонкая штриховая линия).

Для ГО ИСЗФ СО РАН наибольшие коэффициенты корреляции между $I_{557.7}$ и индексом $F_{10.7}$ получены для месяцев май–июль ($K_K \sim 0.63$ –0.73), сентябрь ($K_K \sim 0.81$) и декабрь ($K_K \sim 0.71$). Наименьшие коэффициенты корреляции получены для месяцев марта, апреля ($K_K \sim 0.19$ –0.34). Следует отметить, что коэффициенты корреляции между $I_{557.7}$ и индексом $F_{10.7}$, полученными для периода 1997–2001 гг., для большинства месяцев имеют отрицательные значения, что ранее отмечалось в работе [Mikhailov et al., 2008] при анализе среднегодовых значений $I_{557.7}$.

Полученные коэффициенты корреляции между $I_{557.7}$ и индексом $F_{10.7}$ формально позволяют определить долю вклада солнечной активности в наблюдаемые вариации $I_{557.7}$. В случае парной линейной регрессионной модели коэффициент детерминации (в нашем случае доля влияния солнечной активности) составляет величину от ~ 0.04 –0.1 (слабая сила связи, месяцы март, апрель), ~ 0.4 –0.5 (умеренная сила связи, месяцы май–июль, декабрь) до ~ 0.6 (заметная сила связи, сентябрь). Вероятно, остальная доля вариаций $I_{557.7}$ может быть связана с динамикой и возмущениями нижележащей атмосферы.

Для определения возможного влияния динамики и возмущений нижележащей атмосферы было проведено сопоставление $I_{557.7}$, $F_{10.7}$, глобальных климатических индексов ЭНЮК. Выбор глобальных климатических индексов обусловлен тем, что они могут определять особенности общей циркуляции атмосферы. На рис. 6 представлены вариации среднемесячных значений индекса $F_{10.7}$, $I_{557.7}$ и индекса ONI (Changes to the Oceanic Niño Index) в 1997–2010 гг.

Было получено, что в период 1998–2001 гг., когда отмечалось нарушение прямой зависимости $I_{557.7}$ от уровня солнечной активности [Mikhailov et al., 2008], коэффициент корреляции между $I_{557.7}$ нм и индексом ONI [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml] достигал значений 0.65 при временном сдвиге анализируемых

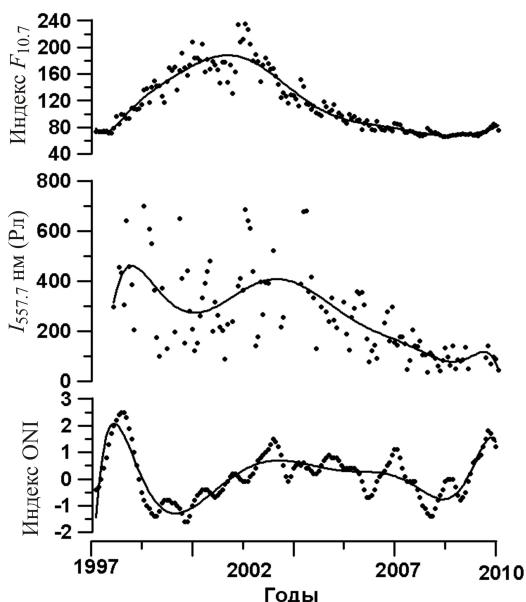


Рис. 6. Вариации среднемесячных значений индекса $F_{10.7}$, $I_{557.7}$ и индекса ONI в 1997–2010 гг. Сплошными линиями приведена интерполяция представленных на рисунке данных полиномами 10-й степени.

рядов в 4 месяца. Этому же периоду соответствует смена типа общей циркуляции атмосферы для европейской части России с преобладанием меридиональной циркуляции [http://meteocenter.net/meteolib/_circ.htm].

Возможное влияние динамики атмосферы, включая стратосферу и тропосферу, на вариации интенсивности эмиссии 557.7 нм неоднократно отмечалось в ряде работ (см., например, [Fukuwama, 1977; Wang et al., 2002]).

Заключение и выводы

Проведенный анализ наблюдаемых вариаций $I_{557.7}$ на разных временных масштабах показал различную степень ее вариабельности. Применяя используемые в статистике показатели вариабельности, можно несколько условно разделить полученные результаты изменчивости эмиссии 557.7 нм на несколько градаций. Например, согласно работе [Юдина, 2010], при значении коэффициента вариации < 0.17 исследуемая совокупность считается абсолютно однородной; при 0.17 – 0.33 – достаточно однородной; при 0.35 – 0.4 – недостаточно однородной, а значение 0.4 – 0.6 говорит о большой неоднородности совокупности. В этом случае только совокупность внутрисуточных значений $I_{557.7}$ (коэффициенты вариаций ~ 0.1 – 0.3) может быть отнесена к однородной, в то время как средние за ночь (коэффициенты вариаций ~ 0.39 – 0.55) и среднемесячные (коэффициенты вариаций ~ 0.56) интенсивности эмиссии 557.7 нм составляют неоднородные совокупности значений.

Достаточно высокая наблюдаемая вариабельность эмиссии 557.7 нм в различных геофизических условиях и на различных временных масштабах является результатом воздействия как регулярных процессов, так и целого спектра одновременных возмущений различной природы в нижней термосфере и мезосфере, стратосфере и тропосфере.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 09-05-00243-а, №08-05-92208-ГФЕН и программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4 (научное направление № 8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Красовский В.И., Семенов А.И., Соболев В.Г., Тихонов А.В. Вариации доплеровской температуры и интенсивности эмиссии 557.7 нм при прохождении ВГВ // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26, № 6. С. 941–945.

Михалев А.В., Белецкий А.Б., Костылева Н.В., Черниковская 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., Ратовский К.Г., Медведев А.В. и др. Одновременные наблюдения усиления атмосферной эмиссии 557.7 нм [ОИ] и образования спорадических слоев в периоды температурных возмущений в стратомезосфере // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 12. С. 1071–1076.

Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.

Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 270 с.

Юдина А.В. Статистика. Часть 1 / Л.И. Александрова http://abc.vvvsu.ru/Books/pr_stat1/. 1999–2010 Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, www.vvvsu.ru.

Beletsky A.B., Gress O.G., Mikhalev A.V., et al. Nightglow behavior during the 16–18 November 2001 passage of the Leonids meteor stream // *Adv. Space Res.* 2004. V. 33, N 9. P. 1486–1490.

Fukuyama K. Airglow variations and dynamics in the lower thermosphere and upper mesosphere III. Variations during stratospheric warming events // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1977. V. 39, N 3. P. 317–331.

Mikhalev A.V., Popov M.S., Kazimirovsky E.S. The manifestation of seismic activity in 557.7 nm emission variations of the Earth's upper atmosphere // *Adv. Space Res.* 2001. V. 27, N 6–7. P. 1105–1108.

Mikhalev A.V., Stoeva P., Medvedeva I.V., et al. Behavior of the atomic oxygen 557.7 nm atmospheric emission in the current solar cycle 23 // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41, N 4. P. 655–659. doi:10.1016/j.asr.2007.07.017.

Petitdidier M., Teitelbaum H. Lower thermosphere emissions and tides // *Planet. Space Sci.* 1977. V. 25, N 8. P. 711–721.

Wang D.Y., Ward W.E., Solheim B.H., Shepherd G.G. Longitudinal variations of green line emission rates observed by WINDII at altitudes 90–120 km during 1991–1996 // *J. Atmos. and Solar Terr. Phys.* 2002. V. 64. P. 1273–1286.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск