

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 мезосферы – нижней термосферы 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 высвечивания 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 качающимися 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 4–5°. Абсолютная калибровка измерительных трактов аппаратуры 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 ночным ходом этой эмиссии и наложенными 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 ночного хода $I_{557.7}$ связан с зависимостью от высоты излучающего слоя фазы солнечного термического полусуточного прилива, обуславливающего 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 несколько дней. На рис. 1 для примера приведены данные ночного хода $I_{557.7}$ 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

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

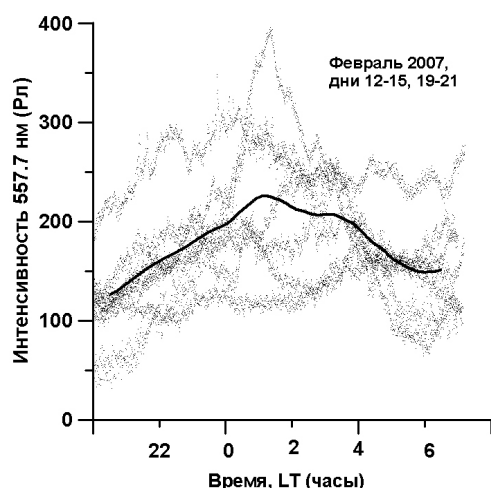


Рис. 1. Ночной ход $I_{557.7}$ в феврале 2007 г. Точки – измерения для 7 ночей: 12–15 и 19–21 февраля. Жирная линия – среднее значение для указанных дней.

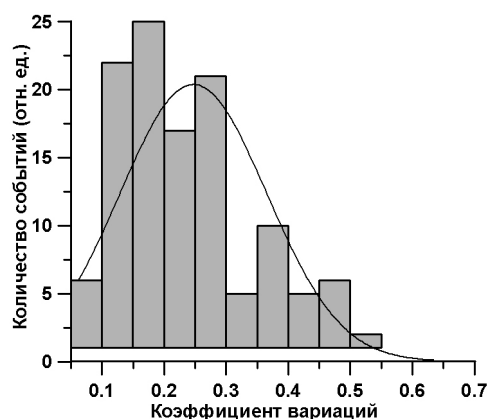


Рис. 2. Гистограмма распределения коэффициента суточных (ночных) вариаций $I_{557.7}$.

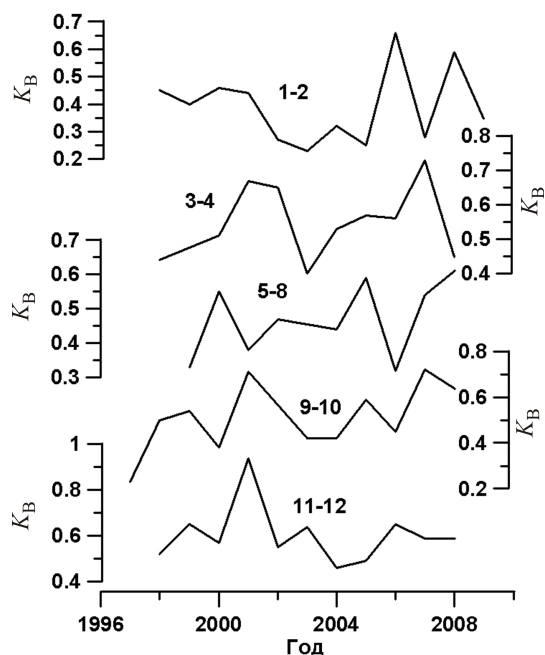


Рис. 3. Коэффициенты вариаций K_V суточных значений $I_{557.7}$ для различных сезонов года. Цифрами над кривыми обозначены месяцы, для которых определялись коэффициенты вариаций.

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.

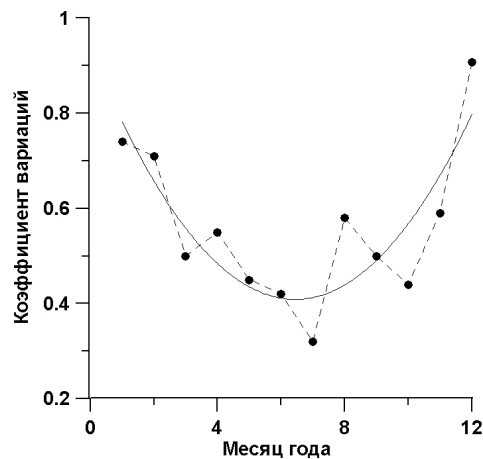


Рис. 4. Коэффициенты вариаций $I_{557.7}$ по данным ГО ИСЗФ СО РАН в 23-м солнечном цикле. На рисунке точками обозначены экспериментальные значения, сплошной линией – интерполяция экспериментальных данных полиномом 2-й степени.

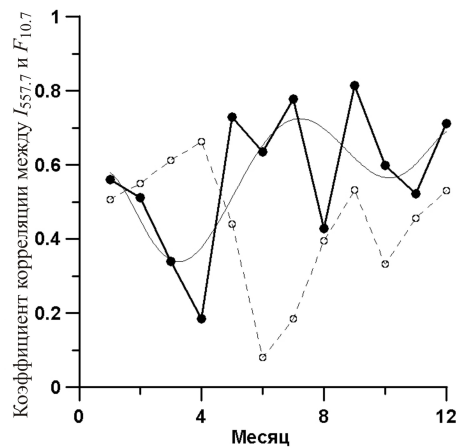


Рис. 5. Коэффициенты корреляции между $I_{557.7}$ и индексом $F_{10.7}$ по данным ГО ИСЗФ СО РАН (темные кружки и толстая сплошная линия – экспериментальные значения, тонкая сплошная линия – интерполяция экспериментальных данных полиномом 6-й степени) в 23-м солнечном цикле и по данным работы [Фишкова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

Для ГО ИСЗФ СО РАН наибольшие коэффициенты корреляции между $I_{557.7}^m$ 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 март, апрель ($K_K \sim 0.19–0.34$). Следует отметить, что коэффициенты корреляции между $I_{557.7}^m$ и индексом $F_{10.7}$, полученными для периода 1997–2001 гг., для большинства месяцев имеют отрицательные значения, что ранее отмечалось в работе [Mikhalev et al., 2008] при анализе среднегодовых значений $I_{557.7}$.

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

Для определения возможного влияния динамики и возмущений нижележащей атмосферы было проведено сопоставление $I_{557.7}^m$, $F_{10.7}$, 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 $F_{10.7}$, $I_{557.7}^m$ 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 [Mikhalev et al., 2008], коэффициент корреляции между $I_{557.7}^m$ и индексом ONI [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml] достигал значений 0.65 при временном сдвиге анализируемых

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, [Fukuyama, 1977; Wang et al., 2002]).

Заключение и выводы

Проведенный анализ наблюдаемых вариаций $I_{557.7}^m$ на разных временных масштабах показал различную степень ее variability. Применяя используемые в статистике показатели variability, 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 $\sim 0.1–0.3$) может быть отнесена к однородной, в то время как средние за ночь (коэффициенты вариаций $\sim 0.39–0.55$) и среднемесячные (коэффициенты вариаций ~ 0.56) интенсивности эмиссии 557.7 нм составляют неоднородные совокупности значений.

Достаточно высокая наблюдаемая variability 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., 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., Ратовский К.Г., Медведев А.В. и др. Одновременные наблюдения усиления атмосферной эмиссии 557.7 нм [OI] 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.

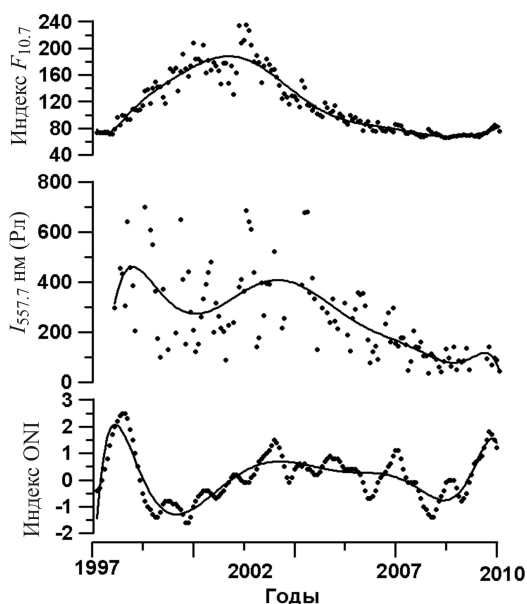


Рис. 6. Вариации среднемесячных значений индекса $F_{10.7}$, $I_{557.7}^m$ и индекса ONI в 1997–2010 гг. Сплошными линиями приведена интерполяция представленных на рисунке данных полиномами 10-й степени.

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.vvsu.ru/Books/pr_stat1/. 1999–2010 Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, www.vvsu.ru.

Beletsky A.B., Gress O.G., Mikhalev A.V., et al. Night-glow 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