

## ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНОЙ ЭМИССИИ 557.7 нм В ПЕРИОД ДЕЙСТВИЯ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ И НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А.В. Михалев

### VARIATIONS OF ATMOSPHERIC EMISSION 557.7 nm DURING THE ACTION OF STRATOSPHERIC WARMINGS UNDER CONDITIONS OF HIGH AND LOW SOLAR ACTIVITY

A.V. Mikhalev

В работе рассматривается эффект аномально высоких средних ночных значений интенсивности атмосферной эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм (высоты высвечивания 85–115 км) в периоды действия внезапных зимних стратосферных потеплений (СП) в Восточной Сибири. Проведенный анализ вариаций интенсивности эмиссии 557.7 нм ( $I_{557.7}$ ) выявил межсуточные колебания  $I_{557.7}$  во время СП и высокие среднемесячные значения  $I_{557.7}$  в зимние месяцы в условиях высокой солнечной активности. В результате было получено, что при высокой солнечной активности в период действия СП на средний уровень  $I_{557.7}$  накладываются колебания с периодами нескольких суток, в максимуме которых и наблюдаются аномально высокие суточные значения  $I_{557.7}$ . Высокий средний уровень  $I_{557.7}$  в зимние месяцы в Восточной Сибири может быть связан с увеличением в 2–3 раза концентрации атомарного кислорода на высотах высвечивания эмиссии 557.7 нм в годы высокой солнечной активности.

The study deals with the effect of abnormally high average night values of the intensity of the atomic oxygen atmospheric emission 557.7 nm (luminescence heights are of 85–115 km) during periods of action of sudden winter stratospheric warmings (SW) in Eastern Siberia. The analysis of variations of the emission intensity 557.7 nm ( $I_{557.7}$ ) showed interdaily oscillations of  $I_{557.7}$  during SW, and high monthly averages  $I_{557.7}$  during winter months under high solar activity. Results show that, under high solar activity, during SW action, mean  $I_{557.7}$  are superimposed with oscillations of periods of few days in the maximum of which abnormally high daily values of  $I_{557.7}$  are observed. The high mean values of  $I_{557.7}$  during winter months in Eastern Siberia can be related with the 2–3 times increase of atomic oxygen density at heights of luminescence of the 557.7 nm emission during years of high solar activity.

#### Введение

Известно, что в период действия внезапных зимних стратосферных потеплений (СП) интенсивности сумеречного и ночного излучения верхней атмосферы испытывают колебания с амплитудой до 40–70 % в сумерки и до 20 % ночью [Фишкова, 1983]. В отдельных случаях отмечались увеличения интенсивности эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм ( $I_{557.7}$ ) до 100 % [Мегрелишвили, Фишкова, 1984]. Проведенные в Восточной Сибири исследования проявлений стратосферных потеплений в вариациях эмиссии 557.7 нм выявили аномально высокие значения этой эмиссии, превосходящие средние сезонные значения на 200–450 % и более [Mikhalev et al., 2001]. Механизм аномального увеличения интенсивности эмиссии 557.7 нм в период действия стратосферных потеплений в настоящее время неизвестен.

В настоящей работе проводится анализ вариаций  $I_{557.7}$  в периоды действия стратосферных потеплений в условиях высокой и низкой солнечной активности в 23-м солнечном цикле с целью определения возможного механизма формирования аномально высоких значений  $I_{557.7}$ .

#### Аппаратура и методы наблюдений

В работе были использованы данные экспериментальных наблюдений эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм, полученные в Геофизической обсерватории (ГО) ИСЗФ СО РАН (52° N, 103° E) в 1997–2008 гг. Оптические измерения проводились с помощью зенитного фотометра «Феникс», рабочие длины волн 557.7 и 630 нм и спектральные интервалы 360–410 и 720–810 нм. Эмиссионные линии 557.7 и 630 нм выделялись интерференционными качающимися светофильтрами ( $\Delta\lambda_{1/2} \sim 1–2$  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.

#### Результаты наблюдений

Аномально высокие значения  $I_{557.7}$  в [Mikhalev et al., 2001] были получены для условий повышенной солнечной активности. В связи с этим возникает вопрос о существовании особенностей проявлений вариаций  $I_{557.7}$  в период действия СП для различных уровней солнечной активности. На рис. 1 представлены примеры межсуточных вариаций  $I_{557.7}$  в периоды действия стратосферных потеплений, соответствующих различным уровням солнечной активности в 23-м солнечном цикле.

Общей характерной особенностью приведенных на рис. 1 графиков является наличие межсуточных колебаний  $I_{557.7}$  с периодами в несколько суток (~4–8), соответствующих периодам планетарных волн. При этом, независимо от уровня солнечной активности, коэффициенты вариаций  $I_{557.7}$ , определяемые как отношение стандартных отклонений к средним за период, сохраняют близкие значения (~0.25–0.5). Полученные коэффициенты вариации в период действия СП оказываются соизмеримы с коэффициентами вариаций (~0.3–0.35), характеризующих разброс средних за ночь интенсивностей относительно среднего регулярного хода для многолетних наблюдений в Абастумани [Фишкова, 1983]. Основное отличие заключается в средних значениях  $I_{557.7}$  для различных уровней солнечной активности. Средние значения  $I_{557.7}$  отличаются в 5–10 раз. Отмеченная особенность оказывается наиболее

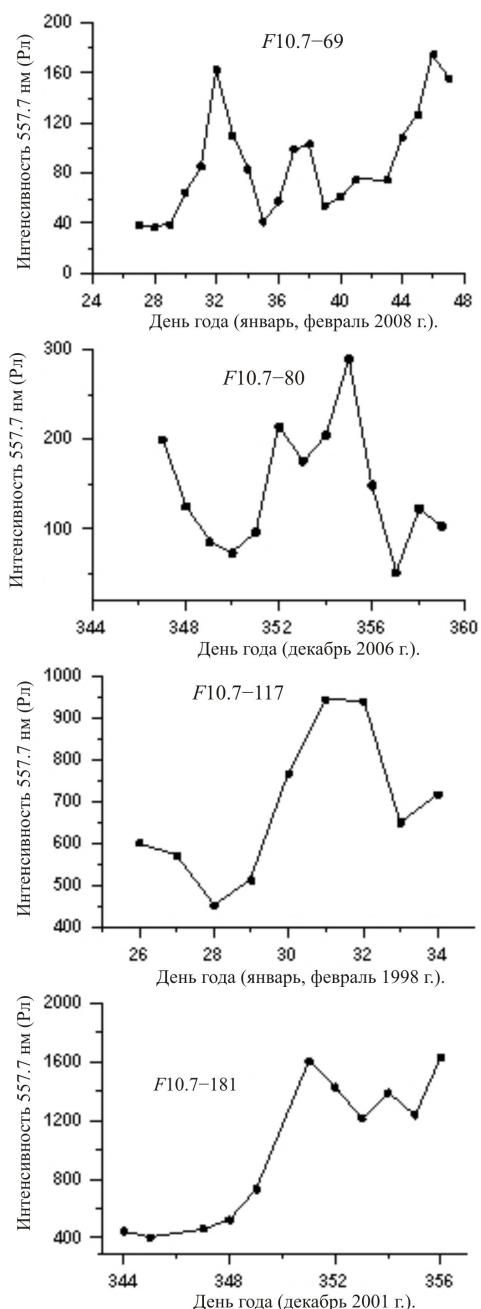


Рис. 1. Межсуточные вариации  $I_{557.7}$  в периоды действия стратосферных потеплений при различных уровнях солнечной активности. Указаны среднегодовые значения индекса  $F_{10.7}$ .

характерной только для зимних месяцев и наиболее сильно проявляется в декабре. Иллюстрацией служит рис. 2, на котором приведено поведение среднемесячных значений  $I_{557.7}$  для марта и декабря в 23-м солнечном цикле по данным ГО ИСЗФ СО РАН. На этом же рисунке для сравнения жирной линией показано поведение среднегодовых значений  $I_{557.7}$ . На рис. 2 знаками «+» и «-» соответственно отмечено наличие или отсутствие положительных аномалий в зональных стратосферных температурах (СП) для декабря согласно [<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/strat-trop/>].

## Обсуждения и выводы

Приведенные выше результаты наблюдений

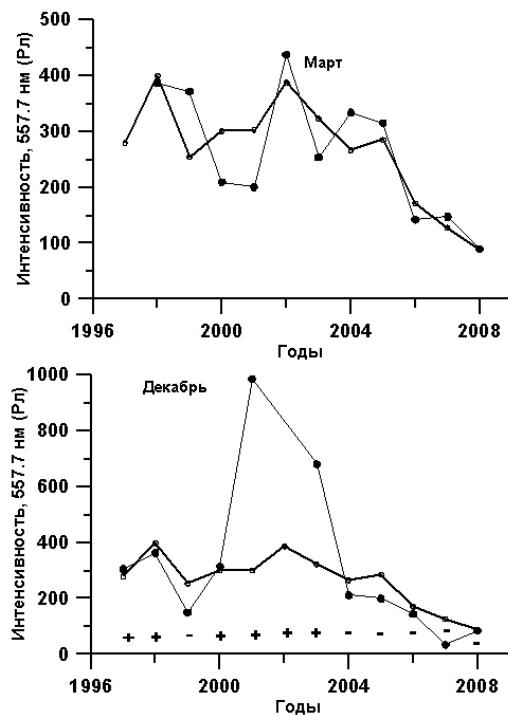


Рис. 2. Поведение среднемесячных значений  $I_{557.7}$  для марта и декабря в 23-м солнечном цикле.

позволяют предположить, что такие параметры вариаций  $I_{557.7}$ , как периоды межсуточных вариаций, коэффициент вариаций в периоды действия СП не зависят от уровня солнечной активности. Аномально высокие ( $\geq 1-2$  кРл) значения  $I_{557.7}$  в отдельные ночи есть результат колебаний  $I_{557.7}$  относительно общего среднего высокого уровня интенсивности эмиссии 557.7 нм, установившегося к моменту проявления стратосферного потепления. В этом случае основной вопрос сводится к установлению причин высокого уровня  $I_{557.7}$  в условиях высокой солнечной активности в 23-м солнечном цикле.

*Изменения интенсивности эмиссии 557.7 нм в пределах солнечного цикла.* Известно, что интенсивность эмиссии 557.7 нм зависит от уровня солнечной активности, в общем случае изменяясь синфазно с ним. Согласно некоторым работам [Гивишили и др., 1996; Wang, et al., 1996; Фишкова и др., 2001],  $I_{557.7}$  в пределах различных солнечных циклов может изменяться в 2–3 раза. Так, в [Гивишили и др., 1996] приводятся многолетние межгодовые вариации  $I_{557.7}$  по данным европейских станций, которые дают фактор изменчивости  $I_{557.7} \sim 2$  в пределах солнечных циклов. В [Wang, et al., 1996] представлены спутниковые данные  $I_{557.7}$  для зимних месяцев и различных уровней солнечной активности, согласно которым изменчивость межгодовых значений  $I_{557.7}$  может достигать величины 3. В [Фишкова и др., 2001] анализировалась зависимость среднемесячных значений  $I_{557.7}$  от уровня солнечной активности ( $F_{10.7}$ ). Наибольшие коэффициенты регрессии получены для марта и апреля. Для этих месяцев  $\Delta I_{557.7} \sim 2$  при  $F_{10.7}$  от 75 до 250. Для декабря полученные коэффициенты регрессии существенно меньше.

Изменчивость среднегодовых значений  $I_{557.7}$  по данным ГО ИСЗФ СО РАН, полученным в Восточ-

ной Сибири, в 23-м солнечном цикле, составила ~4.5. Это несколько превышает полученные значения по данным наблюдений среднеширотных станций в других долготных зонах в предыдущие солнечные циклы но может быть можно объяснить долготными эффектами [Wang, et al., 1996] или особенностями 23-го солнечного цикла [Михалев А.В., Медведева, 2009]; отношение же максимальных и минимальных среднемесячных значений  $I_{557.7}$  в зимний период требует специального рассмотрения. В частности,  $I_1/I_2 \sim 9.5$ , где  $I_1$  – среднее за декабрь для 2001 г. и 2003 г. (период, близкий к максимуму солнечной активности 23-го цикла),  $I_2$  – среднее за декабрь для 2006–2008 гг. (минимум солнечной активности). Отношение экстремальных декабрьских значений  $I_{557.7}$  в 2001 и 2007 гг. дает значение ~28.

*Зависимость интенсивности эмиссии 557.7 нм от концентрации атомарного кислорода.*

В общем случае интенсивность эмиссии 557.7 нм зависит от высотных распределений концентраций атомарного кислорода, состава атмосферных компонент, участвующих в возбуждении и гашении уровня  $^1S[O]$ , и температуры на высотах высыпчивания эмиссионного слоя 557.7 нм [Шефов и др., 2006]. Согласно оценкам [Mikhalev et al., 2001], наблюдаемые изменения температуры на высотах высыпчивания слоя 557.7 нм не могут обеспечить наблюдаемые изменения интенсивности эмиссии 557.7 в пределах солнечного цикла. В силу этого в [Mikhalev et al., 2001] многолетние вариации  $I_{557.7}$  связываются с изменением не менее чем в 1.3 раза концентрации атомарного кислорода в соответствии с амплитудой 11-летних колебаний. В настоящей работе также будет рассмотрен и оценен возможный вклад вариаций концентрации атомарного кислорода, для того чтобы объяснить наблюдаемые вариации и аномально высокие значения  $I_{557.7}$ . В настоящее время считается общепринятым, что интенсивность эмиссии 557.7 нм, независимо от механизма Барта или Чепмена, имеет кубическую зависимость от концентрации кислорода [Шефов и др., 2006], т. е.  $I_{557.7} \sim [O]^3$ . В этом случае изменение среднемесячных значений  $I_{557.7}$  за декабрь от максимума солнечной активности к минимуму около 10 раз, если их связывать только с изменениями концентрации атомарного кислорода, должно сопровождаться соответствующим изменением концентрации атомарного кислорода на высотах высыпчивания эмиссионного слоя 557.7 нм более чем в 2 раза.

*Наблюдаемые масштабы изменчивости концентрации атомарного кислорода на высотах высыпчивания эмиссии 557.7 нм.*

Согласно модельным высотным распределениям концентрации атомарного кислорода [Шефов и др., 2006], отношение годовых значений концентраций атомарного кислорода в максимуме слоя для высокой ( $F_{10.7}=203$ ) и низкой ( $F_{10.7} = 75$ ) солнечной активности составляет ~1.15. При пересчете для единичного столба в приводимом диапазоне высот (84–100 км) эта величина достигает ~1.19, но недостаточна для возможной интерпретации наблюдаемых вариаций  $I_{557.7}$ . Возможно, это связано с отмечаемой

в [Шефов и др., 2006] трудностью учета некоторых факторов (перемещающиеся планетарные волны, долготные эффекты), что приводит к несовпадению данных концентраций атомарного кислорода и модельных для конкретных гелиогеофизических условий. Рассмотрение высотных распределений концентрации атомарного кислорода для отдельных месяцев [Шефов и др., 2006] также не позволяет получить необходимые отношения концентраций атомарного кислорода при различных уровнях солнечной активности.

Между тем, в ряде работ можно найти экспериментальные указания на наличие более значительных вариаций концентрации атомарного кислорода. Например, в работе [Кошелев и др., 1983] при анализе экспериментов по измерению [O] отмечается, что интегральное содержание атомарного кислорода в слое может изменяться примерно в 4 раза на временному масштабе нескольких недель.

Наиболее интересными являются результаты, приводимые в работе [Амосов и др., 2009]. Они указывают на возможное уменьшение концентрации атомарного кислорода в зимние месяцы до трех раз при переходе от максимума солнечной активности к минимуму. Следует отметить, что эти данные относятся к 23-му циклу солнечной активности и тому же региону – Восточной Сибири. Отмеченные в работе [Амосов и др., 2009] особенности изменения концентрации атомарного кислорода в зимние месяцы объясняются увеличением активности планетарных волн в зимний период.

Подтверждением увеличения концентрации атомарного кислорода в годы высокой солнечной активности являются и модельные расчеты концентрации атомарного кислорода в максимуме слоя, полученные с использованием обсуждаемых в настоящей работе оптических данных свечения эмиссии 557.7 нм для периода 2000–2004 гг. [Hong, et al., 2009]. В работе [Hong, et al., 2009] концентрации атомарного кислорода в максимуме слоя, полученные с использованием модельных расчетов интенсивности эмиссии 557.7 нм по механизму Барта и модели MSISE-00 для распределений атмосферных параметров, в декабре 2001 г. в 2 раза превышали соответствующие значения декабря 2004 г.

Если результаты работы [Амосов и др., 2009], указывающие на возможность трехкратного изменения [O] в 23-м солнечном цикле, являются справедливыми и получат дальнейшее подтверждение, то обсуждаемая в настоящей работе значительная изменчивость  $I_{557.7}$  в зимние месяцы при переходе от минимума солнечной активности к максимуму может найти качественное и количественное подтверждение. Отличие зависимостей  $I_{557.7}$  от уровня солнечной активности, получаемых из моделей и данных европейских станций, может быть связано с существованием долготной зависимости для атомарного кислорода при высокой солнечной активности и ее отсутствии при низкой солнечной активности [Дзюбов и др., 1984], обсуждаемой в [Wang, et al., 1996] ролью квазистационарных планетарных волн в планетарном распределении  $I_{557.7}$  и недооценкой роли низкележащей атмосферы или подстилающей поверхности.

Следует добавить, что описанное в [Фишкова, 1983] увеличение  $I_{557.7}$  до 100 % во время СП зимой 1980–1981 гг. также совпадает с периодом максимума солнечной активности.

## Выводы

1. Аномально высокие значения  $I_{557.7}$  в Восточной Сибири в период СП могут быть следствием высокой средней  $I_{557.7}$  интенсивности в зимние месяцы в годы высокой солнечной активности. В период действия СП на средний уровень  $I_{557.7}$  накладываются межсуточные колебания с периодами в несколько суток (~4–8 суток), в максимуме которых и наблюдаются аномально высокие суточные значения  $I_{557.7}$ .

2. Аномально высокий уровень  $I_{557.7}$  в зимние месяцы в Восточной Сибири может быть связан с увеличением в 2–3 раза концентрации атомарного кислорода на высотах выравнивания эмиссии 557.7 нм в годы высокой солнечной активности.

3. Для фиксированной широтно-долготной зоны (Восточная Сибирь) среди возможных причин увеличения концентрации атомарного кислорода в период высокой солнечной активности может рассматриваться активизация атмосферных волн (планетарных, ВГВ), на которые, в свою очередь, оказывают совместное влияние циркуляция атмосферы, термодинамический режим атмосферы и земной поверхности, орография.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 09-05-00243-а, 08-05-92208-ГФЕН-а и Программы Президиума РАН № 16 (часть 3).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аммосов П.П., Гаврильева Г.А., Колтовской И.И. Влияние солнечной активности на концентрацию О в мезопаузе на высоких широтах восточной Сибири. Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД–2009), 22–26 июня 2009 г., Санкт-Петербург. Сборник тезисов. С. 171.

Гивишили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В., Перов С.П. и др. Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32, № 3. С. 329–339.

Дзюбов Д.А., Островский Г.И., Михайлов А.В. Долготные вариации атомного кислорода в термосфере, рассчитанные из ионосферных данных // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т. 24, № 1. С. 69–72.

Кошелев В.В., Клинов Н.Н., Сутырин Н.А. Аэрономия мезосферы и нижней термосферы. М.: Наука, 1983. 184 с.

Михалев А.В., Медведева И.В. Солнечные циклы в вариациях атмосферной эмиссии 557.7 нм // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 09. С. 896–900.

Мегрелишили Т.Г., Фишкова Л.М. Об аномальном поведении сумеречного и ночного излучения верхней атмосферы зимой 1980–1981 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т. 24, № 2. С. 325–326.

Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 271 с.

Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М., Шефов Н.Н. Сезонные вариации зависимости эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм от солнечной активности и многолетнего тренда // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41, № 4. С. 557–562.

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

Hong Gao, Jiayao Xu, Mikhalev A.V., Wei Yuana, Medvedeva I.V. The estimate of the peak density of atomic oxygen between 2000 and 2004 at 52° N // Proc. SPIE. 2009. V. 7296, 72960M. doi:10.1117/12.823817.

Mikhalev A.V., Medvedeva I.V., Beletsky A.B., Kazimirovsky E.S. An Investigation of the Upper Atmospheric Optical Radiation in the Line of Atomic Oxygen 557.7nm in East Siberia // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63, N 9, P. 865–868.

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

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск