

## Атмосферная эмиссия [OI] 557,7 нм в периоды экстремальных событий Эль-Ниньо / Ла-Нинья в 23-м и 24-м солнечных циклах

А.В. Михалев\*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291*

Поступила в редакцию 6.06.2017 г.

Анализируются вариации излучения верхней атмосферы Земли в линии атомарного кислорода 557,7 нм и индекса ONI явления Эль-Ниньо–Южное Колебание (ЭНЮК) в 1997–2017 гг. Выявлена корреляция между этими величинами. Во время продолжительного эпизода Ла-Нинья 1991–2001 гг. отмечалась депрессия эмиссии 557,7 нм, а во время экстремального эпизода Эль-Ниньо 2015–2016 гг. – ее усиление. Рассматриваются возможные механизмы влияния события ЭНЮК на излучение верхней атмосферы Земли. Сделан предварительный вывод, что многолетние и межгодовые вариации интенсивности эмиссии 557,7 нм могут являться следствием совместного влияния солнечной активности и изменений в глобальной циркуляции атмосферы.

*Ключевые слова:* излучение верхней атмосферы, эмиссия 557,7 нм, Эль-Ниньо/Ла-Нинья; airglow, 557.7 nm emission, El Niño/La Niña.

### Введение

Атмосферная эмиссия атомарного кислорода [OI] 557,7 нм – одна из самых ярких дискретных линий в собственном излучении верхней атмосферы Земли в видимом диапазоне спектра. Эта эмиссия возникает на высотах ~85–115 км вследствие реакций рекомбинации атомарного кислорода. В силу своего расположения в интервале высот, охватывающем одновременно мезопаузу и нижнюю термосферу, эмиссия 557,7 нм является уникальным параметром (ввиду чувствительности как к внешнему воздействию, в частности солнечной активности, так и к процессам, протекающим в нижележащих слоях атмосферы) для понимания динамики атмосферы различных временных масштабов на высотах ее высвечивания [1]. В диапазоне больших переменных наиболее значимые вариации эмиссии [OI] 557,7 нм связывают с солнечной активностью [2].

Возможное влияние динамики нижележащей атмосферы, включая стратосферу и тропосферу, на вариации интенсивности эмиссии 557,7 нм ( $I_{557,7}$ ) неоднократно отмечалось в ряде работ (см., например, [3, 4]). Упомянув об Эль-Ниньо–Южное Колебание (ЭНЮК), в связи с особенностями межгодовых вариаций излучения среднеширотной верхней атмосферы Земли, приводятся лишь в отдельных работах. Так, в [5] отмечаются аномально низкие значения интенсивностей атмосферных полос молекул

гидроксила OH (6–2) и кислорода O<sub>2</sub> (0–1) 1997–1998 гг. в южном полушарии. В [6] указывается на нарушение прямой зависимости  $I_{557,7}$  от уровня солнечной активности в 1998–2000 гг. в северном полушарии. Отмеченные особенности в вариациях излучения верхней атмосферы совпали с одним из самых сильных проявлений ЭНЮК в 1997–1998 гг. за весь период наблюдения этого явления. Эпизод Эль-Ниньо 2015–2016 гг. также может быть отнесен к экстремальным событиям ЭНЮК ([http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)).

В настоящей работе представлены результаты исследования возможного влияния явления ЭНЮК на атмосферную эмиссию атомарного кислорода [OI] 557,7 нм в 23-м и 24-м солнечных циклах, которое в ряде случаев может нарушать прямую зависимость эмиссии [OI] 557,7 нм от солнечной активности.

### Аппаратура и методика наблюдений

В статье использованы данные наблюдений эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм, полученные в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН при помощи зенитного фотометра (1997–2010 гг.) и спектрографа (2011–2017 гг.) с низким спектральным разрешением (<http://atmos.iszf.irk.ru/data/spectr/>). Эмиссионные линии в зенитных фотометрах выделялись при помощи интерференционных качающихся светофильтров ( $\Delta\lambda_{1/2} \sim 1\text{--}2$  нм). Угловое поле зрения каналов фотометра составляло

\* Александр Васильевич Михалев (mikhalev@iszf.irk.ru).

~4–5°. Абсолютная калибровка измерительных трактов аппаратуры осуществлялась в отдельные периоды по эталонным звездам и впоследствии контролировалась с помощью калибраторов – стабилизированных источников света. Наблюдения до 2012 г. проводились в ночное время в течение 1–2 нед близко к новолунию, а с апреля 2012 г. – каждую ночь.

## Результаты наблюдений и обсуждение

Эль-Ниньо и Ла-Нинья определяются как длительные температурные аномалии поверхности воды величиной большей чем 0,5 °C в центральной и восточной частях тропической зоны Тихого океана. Если аномалия сохраняется на протяжении 5 мес или дольше, то она классифицируется как эпизод Эль-Ниньо (>+0,5 °C) или Ла-Нинья (>–0,5 °C). Событие Эль-Ниньо–Южное Колебание является более общим понятием. Под ним понимают ряд взаимосвязанных климатических флуктуаций в глобальной системе «океан–атмосфера», которые происходят как последовательность океанических и атмосферных циркуляций. ЭНЮК – это наиболее известный в мире источник межгодовой изменчивости погоды и климата (от 3 до 8 лет). Его индексы достаточно часто используют при исследовании межгодовой климатической изменчивости, включая общую циркуляцию атмосферы (<http://data.oceaninfo.ru/info/index.jsp>). К примеру, индекс ONI (Niño 3.4) представляет собой аномалии температуры поверхности океана (в градусах Цельсия) в симметричной относительно экватора области в центральной части Тихого океана – 5° с.ш. – 5° ю.ш. и 120–170° з.д.

В течение 23–24-го циклов солнечной активности существенные эпизоды Эль-Ниньо (по индексу ONI) отмечались в 1997–1998 и 2015–2016 гг., Ла-Нинья – в 1999–2001 гг., которые могут быть отнесены к экстремально наблюдаемым за последние 50–60 лет [[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)]. На рис. 1 приведены вариации индексов солнечной активности  $F_{10,7}$ , среднемесячных значений интенсивности эмиссии [OI] 557,7 нм и индекса ONI в 23-м (рис. 1, а) и 24-м (рис. 1, б) циклах солнечной активности. Вертикальной штриховой линией отмечен момент времени, начиная с которого наблюдалось устойчивое снижение солнечной активности.

Явление Эль-Ниньо 1997–1998 гг. совпало с фазой роста солнечной активности в 23-м солнечном цикле. В силу этого увеличение интенсивности эмиссии [OI] 557,7 нм может быть интерпретировано и существующей зависимостью от уровня солнечной активности. Эпизод Эль-Ниньо 2015–2016 гг. происходил на спаде солнечной активности 24-го солнечного цикла, и увеличение  $I_{557,7}$  достаточно хорошо коррелирует с ONI. Значимые коэффициенты корреляции  $K$  между ONI и  $I_{557,7}$  в этом случае достигали 0,42–0,44 (количество месяцев  $N = 25$ ) при временном сдвиге 6–8 мес. Событие Ла-Нинья 1999–2001 гг. совпало с максимумом солнечной активности 23-го солнечного цикла и сопровождалось нетипичным снижением (депрессией) интенсивности эмиссии [OI] 557,7 нм, нарушившим прямую зависимость от  $F_{10,7}$ . Значимые коэффициенты корреляции  $K$  между индексом ONI и  $I_{557,7}$  для данного случая достигали 0,38–0,46 ( $N = 52–57$ ) при временном сдвиге 5–6 мес.

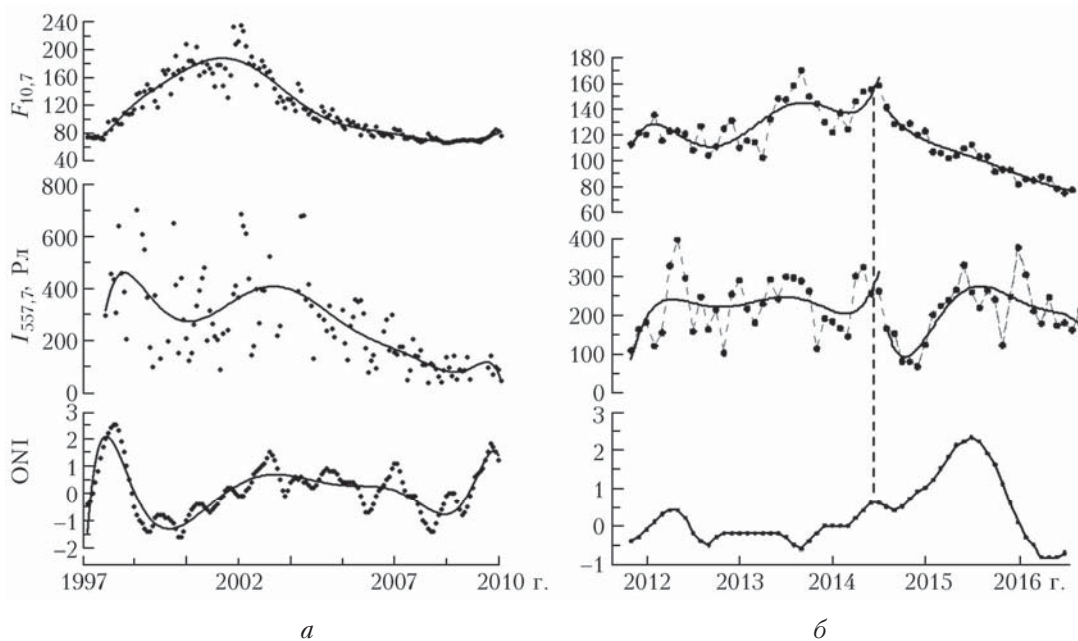


Рис. 1. Вариации среднемесячных значений индексов солнечной активности  $F_{10,7}$ , интенсивности эмиссии [OI] 557,7 нм и индекса ONI в 23-м (а) и 24-м (б) циклах солнечной активности. Точки – среднемесячные значения анализируемых величин, сплошные линии – аппроксимации полиномами 5-й (на кривых  $F_{10,7}$  и  $I_{557,7}$  в 24-м цикле) и 10-й (на кривых  $F_{10,7}$  и  $I_{557,7}$  в 23-м цикле) степеней

Следует отметить, что зависимость  $I_{557,7}$  от индекса ONI можно проследить и в предыдущие солнечные циклы. На рис. 2 представлены многолетние вариации среднегодовых значений интенсивностей эмиссии 557,7 нм, потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см (индекс  $F_{10,7}$ ) и ONI за период 1950–1992 гг. (18–22-й солнечные циклы).

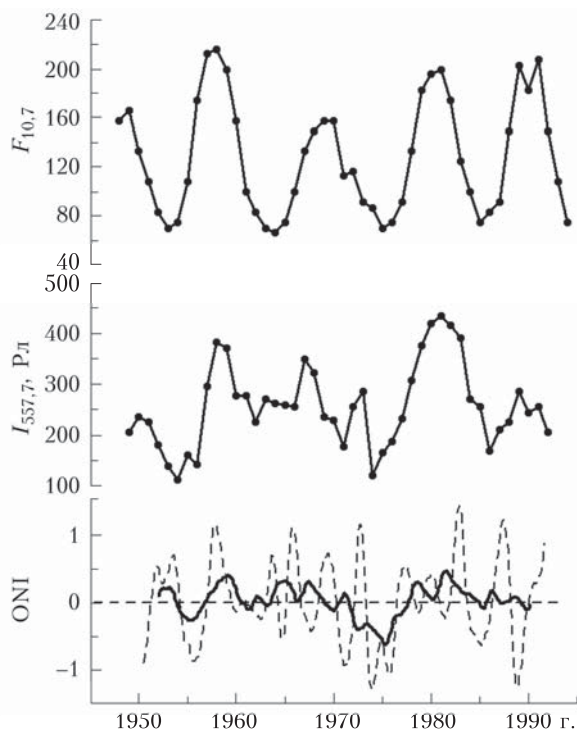


Рис. 2. Вариации интенсивности эмиссии 557,7 нм, потока радиоизлучения Солнца (индекс  $F_{10,7}$ ) и индекса ONI, который представлен двумя кривыми – с усреднением ~1 год (13 мес, штриховая кривая) и с усреднением ~4 года (49 мес, сплошная кривая)

Значения интенсивностей эмиссии 557,7 нм были заимствованы из [7] и представляют собой один из самых длинных опубликованных рядов наблюдений этой эмиссии. Указанный ряд объединяет данные наблюдений трех обсерваторий: Кактус Пик (36,1° с.ш., 117,8° з.д.) с 1948 по 1952 г., Верхний Прованс (43,9° с.ш., 5,7° в.д.) с 1954 по 1957 г. и Абастумани (41,8° с.ш., 42,8° в.д.) с 1958 по 1992 г. В таблице приведены коэффициенты взаимной корреляции между представленными на рис. 2 величинами для двух интервалов времени – за весь анализируемый период (1950–1992 гг.) и за период 1950–1975 гг. Полужирным выделены статистически значимые значения коэффициентов корреляций по критерию Пирсона.

**Коэффициенты корреляций между параметрами эмиссии [OI] 557,5 нм и индексом ONI**

Период	$I_{557,7} - \text{ONI}$	$I_{557,7} - F_{10,7}$	$F_{10,7} - \text{ONI}$	$N$ (число лет)
1950–1992	<b>0,32</b>	<b>0,58</b>	0,22	43
1950–1975	<b>0,45</b>	<b>0,54</b>	0,25	26

В [8] уже отмечалось, что экстремально низкие значения  $I_{557,7}$  в предыдущие солнечные циклы наблюдались в 1954–1956 и 1973–1975 гг., которые совпадали с эпизодами Ла-Нинья.

Среди возможных причин, обуславливающих вариации  $I_{557,7}$  на различных временных масштабах, обычно отмечают полугодовые вариации атмосферной плотности и преобладающих ветров на высотах 85–105 км, меридиональный перенос кислорода, вертикальные ветры и диффузию, реверс зонального ветра, вариации температуры мезосферы и нижней термосферы, вариации диссипации приливов и гравитационных и планетарных волн в контексте глобальной мезосферной циркуляции и/или условий возникновения и распространения внутренних гравитационных и планетарных волн в верхнюю атмосферу в результате изменений циркуляционного режима в тропосфере и стратосфере и другие причины.

Следует отметить, что глобальное распределение интенсивности эмиссии 557,7 нм имеет выраженные широтно-долготные структуры и зависимости. Долготная зависимость интенсивности эмиссии 557,7 нм обнаружена относительно недавно и связывается с существованием квазистационарных планетарных волн [4], проникновение которых в верхнюю атмосферу зависит от условий циркуляции последней. В этом случае можно предположить, что изменение локализации широтно-долготных структур в эмиссии 557,7 нм в периоды отдельных фаз ЭНЮК может приводить к изменениям  $I_{557,7}$  в конкретных широтно-долготных зонах.

В связи с этим интересными являются результаты работы [9], где применительно к эмиссиям верхней атмосферы проведена сравнительная оценка средней планетарной энергии Солнца, поглощенной на высоте ~100 км, и энергии орографических возмущений, генерируемых в тропосфере в виде внутренних гравитационных волн и распространяющихся в верхнюю атмосферу. По результатам [9] эти величины оказываются сопоставимыми и роль циркуляции нижней атмосферы может быть сравнима с непосредственным влиянием солнечной активности.

В [10] анализируются межгодовые различия мезосферных гравитационных волн в излучении ОН за период 2010–2011 гг., которые также связываются с явлением ЭНЮК. При этом постулируется, что крупномасштабные процессы, связанные с ЭНЮК, влияют на наблюдаемые волновую энергетику и динамику на высотах мезосферы, генерируют спектр волн планетарного масштаба и могут приводить к изменениям температуры и плотности во всей атмосфере. В свою очередь, авторы работы [11] при помощи моделирования с использованием моделей WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model), GSWM (Global Scale Wave Model) и TIME-GCM (Thermo-sphere–Ionosphere–Meso-sphere – Electrodynamics General Circulation Model) показали, что событие ЭНЮК вносит вариабельность в некоторые атмосферные параметры на высотах мезосферы–нижней термосферы до 10–30%, а в ионосфере – до 10–15%. Поэтому ЭНЮК сле-

дует рассматривать как потенциально значимый источник изменчивости в верхней атмосфере Земли.

В настоящее время не представляется возможным однозначно указать основные атмосферные параметры или процессы, определяющие предполагаемую связь вариаций эмиссий верхней атмосферы с явлением ЭНЮК.

### Заключение

В результате анализа вариаций среднемесячных значений интенсивности эмиссии 557,7 нм ( $I_{557,7}$ ) и индекса ONI, характеризующего Эль-Ниньо/Ла-Нинья, выявлена статистически значимая корреляция ( $K \approx 0,38-0,46$ ) между этими величинами, которая в ряде случаев нарушает прямую зависимость  $I_{557,7}$  от уровня солнечной активности. Во время продолжительного эпизода Ла-Нинья 1991–2001 гг. отмечалась депрессия  $I_{557,7}$ , а во время экстремального эпизода Эль-Ниньо 2015–2016 гг. — усиление  $I_{557,7}$ .

Показана связь  $I_{557,7}$  с индексом ONI в предыдущие 18–22-й солнечные циклы на основе анализа среднегодовых значений  $I_{557,7}$  и индекса ONI. Полученные результаты позволяют сделать предварительный вывод, что многолетние и межгодовые вариации интенсивности эмиссии 557,7 нм могут быть следствием совместного влияния солнечной активности и изменений в глобальной циркуляции атмосферы.

В работе использовались данные оптического комплекса, входящего в состав ЦКП «Ангара».

Работа выполнена при финансовой поддержке по проекту «Исследование влияния солнечной активности и процессов в нижней атмосфере на изменения термодинамических характеристик атмосферы, Мирового океана и климата» № 0344-2014-0005.

1. *Uma Das, Pan C.J., Sinha H.S.S.* Effects of solar cycle variations on oxygen green line emission rate over Kiso, Japan // *Earth Planets Space*. 2011. V. 63. P. 941–948.

2. *Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М., Шефов Н.Н.* Сезонные вариации зависимости эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм от солнечной активности и многолетнего тренда // *Геомagnetизм и аэрономия*. 2001. Т. 41, № 4. С. 557–562.
3. *Fukuyama K.* Airglow variations and dynamics in the lower thermosphere and upper mesosphere III. Variations during stratospheric warming events // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1977. V. 39, N 3. P. 317–331.
4. *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. Sol.-Terr. Phys.* 2002. V. 64, N 8–11. P. 1273–1286.
5. *Scheer J., Reisin E.R.* Unusually low airglow intensities in the Southern Hemisphere midlatitude mesopause region // *Earth Planets Space*. 2000. V. 52, N 4. P. 261–266.
6. *Mikhalev A.V., Stoeva P., Medvedeva I.V., Benev B., Medvedev A.V.* Behavior of the atomic oxygen 557.7 nm atmospheric emission in the current solar cycle 23 // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41, Is. 4. P. 655–659.
7. *Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В., Перов С.П., Семенов А.И., Сергеевко Н.П., Фишкова Л.М., Шефов Н.Н.* Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 1996. Т. 32, № 3. С. 329–339.
8. *Михалев А.В.* Излучение верхней атмосферы Земли и колебания климатической системы «атмосфера–океан» // *Оптика атмосфер. и океана*. 2012. Т. 25, № 1. С. 66–69; *Mikhalev A.V.* Airglow and variations in the atmosphere–ocean climatic system // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 3. P. 224–227.
9. *Шефов Н.Н.* Солнечная активность и приземная циркуляция как соизмеримые источники вариаций теплового режима нижней термосферы // *Геомagnetизм и аэрономия*. 1985. Т. 25, № 5. С. 848–849.
10. *Ghodpage R.N., Hickey M.P., Taori A.K., Singh D., Patil P.T.* Response of OH airglow emissions to mesospheric gravity waves and comparisons with full-wave model simulation at a low-latitude Indian station // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 9. P. 5611–5621.
11. *Pedatella N.M., Liu H.-L.* Influence of the El Niño Southern Oscillation on the middle and upper atmosphere // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118. P. 2744–2755. DOI: 10.1002/jgra.50286.

#### *A.V. Mikhalev. The [OI] 557.7 nm airglow emission during El Niño/La Niña extreme events in solar cycles 23–24.*

We examine variations in airglow in the 557.7 nm atomic oxygen line and the ONI index of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon in 1997–2017. Correlation between these parameters is revealed. During the prolonged La Niña episode of 1991–2001, the 557.7 nm emission depression was observed, whereas in the extreme El Niño episode of 2015–2016, the 557.7 nm emission increased. We discuss possible mechanisms of the ENSO phenomenon effect on the airglow. A tentative conclusion has been made that long-term and interannual intensity variations in the 557.7 nm emission can result from the joint effect of solar activity and changes in the global atmospheric circulation.