

## АТМОСФЕРА НАД НОРИЛЬСКОМ НИЖЕ 200 КМ В УСЛОВИЯХ МИНИМУМА И МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

**О.Е. Яковлева, Г.П. Кушнаренко, Г.М. Кузнецова**

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
yakovleva@iszf.irk.ru

## THE ATMOSPHERE LOWER 200 KM ABOVE NORILSK DURING THE SOLAR MINIMUM AND MAXIMUM

**O.E. Yakovleva, G.P. Kushnarenko, G.M. Kuznetsova**

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
yakovleva@iszf.irk.ru

**Аннотация.** Получены сезонные изменения относительных величин основных газовых составляющих термосферы  $[O]/[N_2]$  и  $[O_2]/[O]$  в год максимума солнечной активности. Оценки выполнены по методике авторов на основе измерений Норильского дигизонда ( $69^\circ N$ ,  $88^\circ E$ ) на высотах ионосферного слоя F1 (120–200 км) в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях. Проведено сравнение с аналогичными величинами, полученными авторами в течение длительного минимума (2007–2009 гг.) в Норильске. Обнаружено, что относительное содержание атомарных частиц кислорода увеличивается в условиях максимума более чем на 50 % зимой и осенью в спокойные и в возмущенные дни. Весной и в летний период атмосфера обогащается молекулярными частицами кислорода на 20–25 % и в спокойные и в возмущенные дни максимумом относительно условий минимума солнечной активности.

**Ключевые слова:** отношения газовых составляющих, геомагнитные возмущения.

**Abstract.** The season variations of the relative values of the main gas components of the thermosphere  $[O]/[N_2]$  and  $[O_2]/[O]$  during solar activity maximum year were obtained. Estimates performed by means of technique of the authors based on measurements of the Norilsk digisonde ( $69^\circ N$ ,  $88^\circ E$ ) at altitudes of the ionospheric layer F1 (120–200 km) in the quiet and disturbed geomagnetic conditions. A comparison was made with similar values obtained by the authors over a long minimum (2007–2009) in Norilsk. It was found that the relative content of atomic oxygen particles increases under maximum conditions by more than 50 % in winter and autumn on quiet and disturbed days. In the spring and in the summer, the atmosphere is enriched with molecular oxygen particles by 20–25 % both on calm and disturbed days of maximum relative to the conditions of minimum solar activity.

**Keywords:** gas component ratios, geomagnetic disturbances.

### ВВЕДЕНИЕ

Газовый состав на высотах, где располагается область F1 ионосферы, характеризуется, в основном, отношением атомных частиц кислорода к молекулам кислорода и азота. Влияние газового состава на величину электронной концентрации  $N$  и форму профиля  $N(h)$  особенно отчетливо проявляется на высотах ниже 200 км, где обычно выполняется условие фотохимического равновесия. Это позволяет с помощью полуэмпирической модели (ПЭМ) [Щепкин и др., 1997] описать связь  $N$  с газовым составом, его температурой и с потоком солнечного излучения. Используя ПЭМ и результаты регулярных измерений Норильского ионизонда ( $69^\circ N$ ,  $88^\circ E$ ), мы получили отношения  $[O]/[N_2]$  и  $[O_2]/[O]$  по известной авторской методике [Кушнаренко и др., 2011] на высотах 120–200 км за период длительного минимума 2007–2009 гг. По этим материалам был представлен доклад на БШФФ-2015 [Яковлева и др., 2015]. В связи с накоплением необходимых данных по измерениям дигизонда на ст. Норильск, появилась возможность провести расчеты и для других условий солнечной активности, в частности для максимума. Мы представляем наши оценки отношений  $[O]/[N_2]$  и  $[O_2]/[O]$  на высотах 120–200 км для максимума. Проведено сравнение с соответствующими величинами, ранее полученными для минимума солнечной активности.

### МЕТОД И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Полуэмпирическая модель основана на уравнении регрессии (1):

$$N / N_{av} = X_1 + X_2 \left[ n_1 / (5n_2 + n_3) \right]^{1.5} + X_3 \left( n_1 / n_3 \right)^{0.5} (\cos \chi)^{0.5} + X_4 \exp \left[ - (T_{ex} - 600) / 600 \right] + X_5 (E / E_0). \quad (1)$$

Здесь  $N$  — электронная концентрация,  $N_{av}$  определяет среднее значение  $N$  по всему объему данных отдельно для каждой высоты.  $X_j$  — коэффициенты уравнения модели,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  — концентрации атомарного кислорода, молекул кислорода и азота.  $T_{ex}$  — температура экзосферы,  $\chi$  — зенитный угол Солнца. Уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$N / N_{av} = X_1 + X_2 R \sqrt{RW} + X_3 \sqrt{R} (\cos \chi)^{0.5} + X_4 \exp \left[ - (T_{ex} - 600) / 600 \right] + X_5 (E / E_0). \quad (2)$$

Обозначения:  $R = [O]/[N_2]$ ,  $W = [1/(1+5R_2)]^{1.5}$ ,  $R_2 = [O_2]/[N_2]$ ,  $R_2/R = [O_2]/[O]$ . Величины  $[O]$ ,  $[O_2]$  и  $[N_2]$  — компоненты нейтральной атмосферы.  $E_0$  — энергия ионизирующего излучения  $E$  при максимуме солнечной активности. В расчетах использовались модели термосферы [Hedin, 1987; Picone et al., 2002], модель [Tobiska, Eparvier, 1998] для определения энергии излучения. Значения  $N$  брались по результатам норильского дигизонда на высотах 120–200 км. Из выражения (2) по этим данным можно оценить величины  $R$ ,  $R_2$ ,  $R_2/R$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С помощью нашего метода можно оценить отношения газовых составляющих  $[O]/[N_2]$  и  $[O_2]/[O]$  на

высотах ионосферного слоя F1 120–200 км в дневные часы (07:18 LT). В расчетах используются данные по электронной концентрации на указанных высотах, полученные из измерений Норильского дигизонда (69° N, 88° E). Для исследования выбирались дни со спокойными и возмущенными геомагнитными условиями во все сезоны года максимума солнечной активности (2014 г.). Значения индексов  $F10.7$ ,  $A_p$  и  $Dst$  получены из базы данных WDC-C2 в Киото [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. Для каждого дня считали средние величины  $[O]/[N_2]$  и  $[O_2]/[O]$  за околополуденные часы (10:14 LT), а затем находили средние значения отдельно для каждого сезона. Результаты показаны в таблице. Для сравнения здесь же приведены оценки  $[O]/[N_2]$  и  $[O_2]/[O]$  для 2008 г., одного из трех лет длительного минимума.

Средние отношения  $[O]/[N_2]$  и  $[O_2]/[O]$  в max (2014) и min (2008)

Год	F10.7	$[O]/[N_2]$							
		Зима		Весна		Лето		Осень	
		возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.
2008	69	0.223	0.231	0.180	0.190	0.168	0.179	0.189	0.215
2014	146	0.467	0.496	0.183	0.274	0.172	0.178	0.370	0.490
		$[O_2]/[O]$							
2008	69	0.630	0.590	0.541	0.495	0.512	0.468	0.450	0.434
2014	146	0.668	0.590	0.541	0.495	0.598	0.522	0.531	0.454

а) Отношение  $[O]/[N_2]$  во все сезоны минимума показывает незначительное (6–12 %) уменьшение величин  $[O]/[N_2]$  при переходе от спокойных условий к возмущенным. Причина, возможно, в том, что рассматривались слабовозмущенные события во время последнего минимума, который характеризовался необычайно спокойной геомагнитной обстановкой [Белов, Гайдаш, 2009]. Значения  $[O]/[N_2]$  максимальны зимой и минимальны летом: уменьшение от одного сезона к другому составляет около 25 %, и в возмущенные и в спокойные дни во все три года длительного минимума. В этот период наши оценки  $[O]/[N_2]$  в разумных пределах сопоставимы со значениями по измерениям УФ-спектрометра GUVI (высоты 60–180 км) [<http://guvitimed.jhuapl.edu>] для весенних и летних сезонов: величины по GUVI составляют — 0.1–0.3 (см. таблицу). Осенью и зимой соответствие имеет место в отдельных случаях. По-видимому, используемые в нашем методе модели термосферы не всегда и не во все сезоны корректно описывают газовый состав в регионе Норильска.

В максимуме, как и в минимуме солнечной активности, отношения  $[O]/[N_2]$  наибольшие зимой и минимальные летом: изменение от одного сезона к другому — в 2.7 раза и в спокойные и в возмущенные дни, что намного превышает аналогичную величину в условиях минимума (25 %). Объяснение, по-видимому, в аномально низком уровне солнечного EUV-излучения в последнем минимуме. Измерения показали уменьшение энергии на 15 % в сравнении с предыдущими двумя минимумами [Solomon et al, 2010]. Поскольку EUV-излучение контролирует температуру и плотность термосферы, в последнем минимуме термосфера была необычно холодной, а ионосфера — ниже и прохладнее в сравнении с аналогичными условиями в прошлом [Emmert et al, 2010].

В условиях максимума отмечается небольшое уменьшение (порядка 3–6 %) в значениях  $[O]/[N_2]$

при переходе от спокойных к возмущенным условиям зимы и лета, в то время как весной и осенью — до 50 и 20 %, соответственно. Возможно, за это ответственны более возмущенные геомагнитные условия в равноденственные периоды — весной и осенью.

Изменение по сезонам от минимума к максимуму происходит так: весной отношения  $[O]/[N_2]$  увеличиваются на 25 %, почти не меняются летом и значительно (на 50–56 %) возрастают осенью и зимой.

б) Отношение  $[O_2]/[O]$ . Для условий минимума наибольшие значения  $[O_2]/[O]$  — в зимние сезоны в спокойных и в возмущенных условиях, минимальные — осенью. В максимуме наибольшие значения  $[O_2]/[O]$  летом и весной, наименьшие — осенью. В сравнении со спокойными днями значения  $[O_2]/[O]$  увеличиваются во время возмущений во все сезоны и в максимуме и в минимуме солнечной активности, причем в спокойных условиях минимума это изменение в пределах 10 %. В период максимума увеличение в возмущения довольно значительное: зимой и весной — до 20 %, осенью — 38 %, лишь летом — порядка 12 %. По-видимому, более возмущенные геомагнитные условия в максимуме солнечной активности вносят свой вклад, как отмечалось выше.

Сезонные изменения при переходе от минимума к максимуму таковы: зимой и осенью величины  $[O_2]/[O]$  уменьшаются в пределах 50 %, лишь в спокойных условиях осенью — до 35 %. Весной в спокойных и в возмущенных условиях отношение  $[O_2]/[O]$  увеличивается от 15 до 20 %, летом — до 25 % и приобретает наибольшие значения в сезонах максимума солнечной активности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения, которые претерпевают отношения  $[O]/[N_2]$  и  $[O_2]/[O]$  на высотах ниже 200 км в минимуме и максимуме солнечной активности, по нашим оценкам, таковы:

1. Величины  $[O]/[N_2]$  во все сезоны минимума солнечной активности незначительно уменьшаются (до 6–12 %) при переходе от спокойных условий к возмущенным. Причина, возможно, в том, что рассматривались слабовозмущенные события во время последнего минимума, который характеризовался необычайно спокойной геомагнитной обстановкой.

2. В максимуме, как и в минимуме, отношения  $[O]/[N_2]$  максимальны зимой и минимальны летом: изменение от одного сезона к другому — в 2.7 раза и в спокойные и в возмущенные дни, что намного превышает аналогичную величину (25 %) во время минимума. Причина, по-видимому, в аномально низком уровне солнечного EUV-излучения в последнем минимуме.

3. Незначительные изменения (порядка 3–6 %) в величинах  $[O]/[N_2]$  характерны для перехода от спокойных к возмущенным условиям зимнего и летнего сезонов в максимуме солнечной активности, в то время как весной и осенью это уменьшение до 50 и 20 %, соответственно. Возможно, ответственны за это более возмущенные геомагнитные условия в периоды весеннего и осеннего равноденствий.

4. В максимуме наибольшие значения  $[O_2]/[O]$  летом и весной, наименьшие — осенью. Во время

возмущений значения  $[O_2]/[O]$  увеличиваются во все сезоны и в максимуме и в минимуме солнечной активности. В период максимума возрастание довольно значительное: зимой и весной до 20 %, осенью — 38 %, лишь летом — порядка 12 %. Во время минимума это изменение — в пределах 10 % во все сезоны.

5. В итоге, в атмосфере над Норильском на высотах ниже 200 км в условиях максимума изменения в сезонах в сравнении с минимумом солнечной активности, по нашим оценкам, таковы:

- относительное содержание атомарных частиц кислорода  $[O]/[N_2]$  увеличивается более чем на 50 % зимой и осенью в спокойные и в возмущенные дни. В то же время эта величина почти не меняется в спокойные весенние дни и в летний период;

- относительное содержание молекулярной составляющей частиц кислорода  $[O_2]/[O]$  зимой и осенью уменьшается до 50 % при возмущениях и в спокойных условиях, осенью — до 35 %. Весной и в летний период атмосфера в условиях максимума на 20—25 % обогащается молекулярными частицами кислорода и в спокойные и в возмущенные дни.

6. Достоверность обсуждаемым оценкам придается вполне разумное соответствие с данными по GUVI [Кушнаренко и др., 2014] и использование в нашем методе экспериментальных данных по электронной концентрации, полученных из результатов метода вертикального зондирования ионосферы над Норильском.

Работа выполнена в рамках базового финансирования проекта П.16.1.1. «Исследование влияния солнечной активности и процессов в нижней атмосфере на изменения термодинамических характеристик атмосферы, Мирового океана и климат». Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckprf.ru/ckp/3056>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белов А.В., Гайдаш С.П. Аномально низкая солнечная и геомагнитная активность в 2007 г. // Геомагнетизм и аэронаука. 2009. Т. 49. № 5. С. 595–602.

Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М., Колпакова О.Е. Оценки отношений основных газовых составляющих во время сильных и умеренных геомагнитных возмущений в период спада и минимума солнечной активности // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 19. С. 134–139.

Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Сезонные изменения отношений основных газовых составляющих термосферы в последнем минимуме солнечной активности (2007–2009 гг.) // Солнечно-земная физика. 2014. Вып. 25. С. 29–32.

Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Фрейзон И.А., Кузнецова Г.М. Связь электронной концентрации в средней ионосфере с состоянием термосферы // Геомагнетизм и аэронаука. 1997. Т. 37, № 5. С. 106–113.

Яковлева О.Е., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Основные газовые составляющие термосферы  $[O]/[N_2]$  и  $[O_2]/[O]$  в годы минимума солнечной активности (2007–2009 гг.) на станции «Норильск» // БШФФ, XIV Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 14–18 сент. 2015 г. Тезисы докладов. С. 63.

Emmert J.T., Lean J.L., Picone J.M. Record low thermospheric density during the 2008 solar minimum // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. L12102. DOI: [10.1029/2010GL043671](https://doi.org/10.1029/2010GL043671).

Hedin A.E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, N A5. P. 4649–4662.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. (GTD7-2000) NRLMSISE-00 Empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A12. P. 1469. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).

Solomon S.C., Woods T.N., Didkovsky L.V., et al. Anomalous low solar extreme ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. L16103. DOI: [10.1029/2010GL044468](https://doi.org/10.1029/2010GL044468).

Tobiska W.K., Eparvier F.G. EUV97: Improvements to EUV irradiance modeling in the soft X-rays and EUV // Solar Phys. 1998. V. 147, N 1. P. 147–159.

URL: <http://guvitimed.jhuapl.edu>.

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>.

URL: <http://ckprf.ru/ckp/3056>.