

ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТЕРМОСФЕРЫ [O]/[N₂] И [O₂]/[O] В ГОДЫ МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ (2007–2009 гг.) НА СТАНЦИИ НОРИЛЬСК

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

MAIN GAS COMPONENTS [O]/[N₂] AND [O₂]/[O] OF THE THERMOSPHERE IN SOLAR ACTIVITY MINIMUM (2007–2009) AT THE NORILSK STATION

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

Получены отношения основных газовых составляющих термосферы [O]/[N₂] и [O₂]/[O] на высотах ниже 200 км на двух ионосферных станциях Норильск (69° N, 88° E) и Иркутск (52° N, 104° E) во время последнего минимума солнечной активности (2007–2009 гг.). Оценки выполнены по методике авторов с использованием данных по электронной концентрации, полученных из измерений методом вертикального зондирования ионосферы. Исследовались сезонные изменения указанных отношений в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях.

The main gas components ratios [O]/[N₂] and [O₂]/[O] of the thermosphere were received in the heights lower 200 km at two ionospheric stations Norilsk (69° N, 88° E) and Irkutsk (52° N, 104° E) during the last solar activity minimum years (2007–2009). Estimates performed by means of technique of the authors with using of the electron density data derived from the vertical soundings measurements of the ionosphere. The season variations of the main ratios were studied in the quiet and disturbed geomagnetic conditions.

Введение

В настоящее время не потеряла актуальности задача определения нейтральных газовых составляющих термосферы в различных гелио- и геофизических условиях с помощью ионосферных измерений. Использование в нашей методике данных регулярных измерений методом вертикального зондирования ионосферы позволяет отслеживать состояние термосферы в определенные моменты. В работе получены отношения [O]/[N₂] и [O₂]/[O] на высотах нижней ионосферы в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях в разные сезоны последнего минимума 2007–2009 гг. Расчеты выполнены для ст. Норильск. Проведено сравнение с аналогичными оценками отношений [O]/[N₂] и [O₂]/[O] в Иркутске.

Метод и используемые данные

Полуэмпирическая модель основана на уравнении регрессии [Щепкин и др., 1997]:

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

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, χ – зенитный угол Солнца. Уравнение (1) можно записать в следующем виде:

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

Здесь: $R=[O]/[N_2]$, $W=[1/(1+5R_2)]^{1.5}$, $R_2=[O_2]/[N_2]$, $R_2/R=[O_2]/[O]$. Величины [O], [O₂] и [N₂] – компоненты нейтральной атмосферы. E_0 – значение энергии потока ионизирующего излучения E при максимуме солнечной активности. В расчетах использовалась модель термосферы [Hedin, 1987], модель

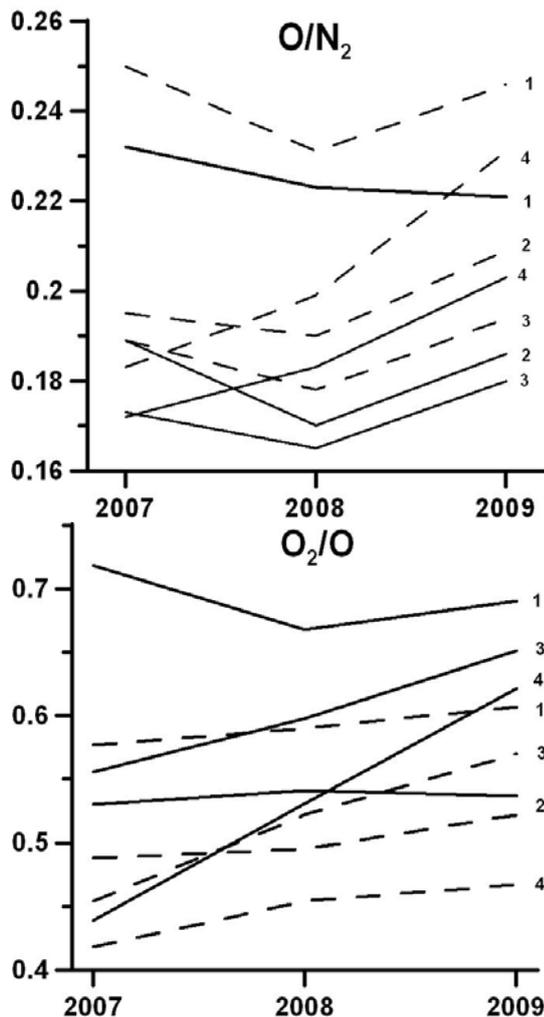
[Tobiska и др., 1998] для определения энергии ионизирующего излучения. Значения N брались на высотах 120–200 км. По этим данным из выражения (2) можно оценить величины R , R_2 , R_2/R . Подробно метод описан в работе [Кушнаренко и др., 2011].

Обсуждение результатов

Предложенный метод позволяет оценивать отношения газовых составляющих [O]/[N₂] и [O₂]/[O] для дневных часов (07–18 LT). Оценки относятся к высоте опорного уровня верхней термосферы 120 км. При этом используются данные по электронной концентрации на высотах 120–200 км, полученные из измерений методом вертикального зондирования ионосферы. Для исследования выбирались дни со спокойными и возмущенными геомагнитными условиями во все сезоны периода (2007–2009 гг.). Значения индексов F10.7, Ap и D_{st} получены из базы данных WDC-C2 в Киото [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. Для каждого дня считали среднее значение [O]/[N₂] и [O₂]/[O] за околополуденные часы (10–14 LT), а затем находили величину средних отношений отдельно для каждого сезона всех трех лет. Результаты показаны в таблице.

Отношение [O]/[N₂], ст. Норильск (таблица). Во все сезоны наблюдается незначительное (6–12 %) уменьшение значений при переходе от спокойных условий к возмущенным. Отношения [O]/[N₂] максимальны зимой и минимальны летом: в спокойные дни уменьшение от одного сезона к другому составляет 23 %, в возмущенные дни – 20–26 % во все годы. Осенью [O]/[N₂] увеличивается на 15 % в возмущенных и на 20 % в спокойных условиях при движении от 2007 г. к 2009 г., в то время как в остальные сезоны это отношение меняется слабо (рисунок) Возможная причина – в сезонной перестройке циркуляции термосферного ветра в равноденственный осенний период [Lastovicka, 2002].

Мы сравнили наши оценки [O]/[N₂] со значениями, полученными из измерений УФ-спектрометра GUVI (высоты 60–180 км) [<http://guvi.jhuapl.edu>]. Для



Средние отношения $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ в минимуме солнечной активности (2007–2009 гг.) в спокойных условиях (пунктирные линии) и во время возмущений (сплошные линии). Сезоны обозначены цифрами: 1 – зима; 2 – весна; 3 – лето; 4 – осень.

весенних сезонов оценки по GUVI хорошо сопоставимы с нашими: они составляют 0.1–0.3 (таблица). В летние сезоны значения по GUVI – 0.1–0.2, реже – 0.3–0.35. Осенью соответствие имеет место только в отдельных случаях. Зимой значения по GUVI выше наших оценок. По-видимому, используемая в нашем методе модель MSIS-86 не всегда корректно описывает газовый состав в регионе Норильска.

Отношение $[O_2]/[O]$, ст. Норильск (таблица). Наибольшие значения $[O_2]/[O]$ – в зимние сезоны всех трех лет в спокойных и в возмущенных условиях, минимальные – осенью. Значения $[O_2]/[O]$ во время возмущений увеличиваются в сравнении со спокойными днями во все сезоны. Отметим, что во все сезоны в спокойных условиях значения $[O_2]/[O]$ возрастают при движении от 2007 г. к 2009 г. (см. рисунок). Это характерно и для возмущений в летний и осенний периоды.

Сравнение результатов (ст. Норильск и Иркутск)

Нагревание на авроральных широтах во время геомагнитных возмущений вызывает расширение и подъем нейтральной атмосферы. На ионосферных

высотах это проявляется в увеличении плотности молекулярных масс $[N_2]$ и $[O_2]$ и уменьшении атомной массы $[O]$, как было показано в спутниковых измерениях [Goncharenko и др., 2006]. Расширение нейтральной атмосферы на высоких широтах приводит также к значительным изменениям в динамике всей термосферы. Это вызывает направленный к экватору ветер, который переносит изменения в нейтральном составе от авроральных к более низким широтам. Ветровой механизм ответственен и за сезонную зависимость проникновения уменьшенного $[O/N_2]$ к более низким широтам: дневной осредненный ветер летом направлен к экватору и поддерживает распространение $[O/N_2]$ к более низким широтам, в то время как зимняя циркуляция ограничивает движение, направленное к экватору. В связи с этим можно ожидать, что на ст. Норильск оценки отношений $[O_2]/[O]$ в отдельные сезоны окажутся выше, а оценки $[O/N_2]$ – ниже, чем на ст. Иркутск, поскольку Норильск находится в полярной зоне. Оценки отношений $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ в период минимума 2007–2009 гг. для ст. Иркутск были получены ранее [Кушнаренко и др., 2015]. Значения средних $[O]/[N_2]$ в Иркутске выше, чем в Норильске (таблица) во все сезоны трех лет – в спокойных условиях зимы, весны и лета на величину 3–25 %, осенью, в среднем, на 30 %. Во время возмущений эти превышения составляют осенью до 40 %, в другие сезоны – до 35 %. В Норильске в спокойных и возмущенных условиях самые высокие значения $[O]/[N_2]$ – в зимние сезоны, самые низкие – летом и, в 2007 г., осенью. Величины $[O_2]/[O]$ в Норильске зимой выше иркутских во все три года в спокойных и возмущенных условиях, в среднем, на 25 % и 30 %, соответственно. В 2009 г. отношения $[O_2]/[O]$ в Норильске во все сезоны выше иркутских.

Заключение

1. Средние отношения $[O]/[N_2]$ в Норильске максимальны зимой и минимальны летом: в спокойные дни уменьшение от одного сезона к другому составляет 23 %, в возмущенные – 26 %. Во все сезоны во время возмущений $[O]/[N_2]$ уменьшаются.

2. При движении от 2007 г. к 2009 г. величины $[O]/[N_2]$ в осенний период в спокойных и возмущенных условиях увеличиваются на 20 %. В другие сезоны это отношение меняется слабо, уменьшаясь зимой и весной в среднем на 7 %.

3. Сравнение наших оценок $[O]/[N_2]$ со значениями на основе измерений УФ-спектрометра GUVI показывает разумное соответствие. Для весенних сезонов оценки по GUVI составляют 0.1–0.3 для возмущенных и спокойных дней; летом значения по GUVI – 0.1–0.2; осенью соответствие имеет место для отдельных событий; зимние значения по GUVI выше наших оценок. По-видимому, используемая в нашем методе модель MSIS-86 не всегда корректно описывает газовый состав в регионе Норильска.

4. Наибольшие значения $[O_2]/[O]$ в Норильске зимой во все годы и в спокойных и в возмущенных условиях, минимальные – осенью. Отношения $[O_2]/[O]$ увеличиваются во время геомагнитных возмущений во все сезоны.

5. При движении от 2007 г. к 2009 г. значения $[O_2]/[O]$ увеличиваются во все сезоны в спокойных условиях. Это характерно и для возмущенных условий в летний и осенний периоды: возрастание – 15 % и 30 %, соответственно.

6. В Норильске значения $[O]/[N_2]$ меньше, чем в Иркутске, во все сезоны трех лет – в спокойных условиях зимы, весны и лета на 3–25 %, осенью – на 30 %.

7. Величины $[O_2]/[O]$ в Норильске зимой выше иркутских во все три года в спокойных и возмущенных условиях в среднем, на 25 % и 30 %, соответственно. В 2009 г. $[O_2]/[O]$ в Норильске выше, чем в Иркутске во все сезоны, особенно большое превышение осенью: в спокойные дни – до 24 %, в возмущенные – до 40 %.

8. Отметим, что решение задачи оценки отношений основных газовых составляющих термосферы осуществляется на базе регулярных ионосферных измерений методом вертикального зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кушнарченко 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.

Кушнарченко Г.П., Кузнецова Г.М., Яковлева О.Е. Сезонные изменения отношений основных газовых составляющих термосферы в последнем минимуме солнечной активности (2007–2009 гг.) // Солнечно-земная физика. 2015. Вып. 25. С. 29–32.

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

Goncharenko L., Salah J., Crowley G., et al. Large variations in the thermosphere and ionosphere during minor geomagnetic disturbances in April 2002 and their association with IMF B_y // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, A03303. DOI: 10.1029/2004JA010683.

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

Lastovicka J. Monitoring and forecasting of ionospheric space weather-effects of geomagnetic storms // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2002. V. 64. P. 697–705.

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.

<http://guvi.jhuapl.edu/>.

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

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия