

**ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В НЕЙТРАЛЬНОМ ГАЗОВОМ СОСТАВЕ
ТЕРМОСФЕРЫ НАД НОРИЛЬСКОМ (2003–2013 гг.)****LONG-TERM VARIATIONS IN THE NEUTRAL GAS COMPOSITION
OF THE THERMOSPHERE OVER NORILSK (2003–2013)****Г.П. Кушнаренко***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kusch@iszf.irk.ru***О.Е. Яковлева***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, yakovleva@iszf.irk.ru***Г.М. Кузнецова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kuz@iszf.irk.ru***G.P. Kushnarenko***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kusch@iszf.irk.ru***O.E. Yakovleva***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, yakovleva@iszf.irk.ru***G.M. Kuznetsova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kuz@iszf.irk.ru*

Аннотация. Сезонные изменения относительных величин основных газовых составляющих термосферы $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ получены для ст. Норильск за период 2003–2013 гг. Оценки выполнены по методике авторов и по данным Норильского дигизонда (69° N, 88° E) для высот ниже максимума ионосферного слоя F1 в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях для разных сезонов. Получено, что $[O_2]/[O]$ в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях к концу 2013 г. уменьшается во все сезоны на 10–20 % по отношению к значениям 2003 г. Отношение $[O]/[N_2]$ для тех же условий увеличивается до 17 %.

Ключевые слова: газовые составляющие термосферы, геомагнитные возмущения, сезонные изменения.

Abstract. Seasonal variations in relative values of the main gas components of the thermosphere $[O]/[N_2]$ and $[O_2]/[O]$ were received at the station Norilsk during the period 2003–2013. Estimates were made using a technique the authors developed and data from the Norilsk digisonde (69° N, 88° E) for heights below the ionospheric layer F1 maximum under quiet and disturbed geomagnetic conditions in different seasons. We established that the $[O_2]/[O]$ ratio in the quiet and disturbed geomagnetic conditions in all seasons by the end of 2013 decreased from 10 to 20 % relative to the values of 2003. The $[O]/[N_2]$ ratio for the same conditions increased to 17 %.

Keywords: thermospheric gas components, geomagnetic disturbances, seasonal variations.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее исследование является продолжением аналогичной работы, выполненной для ст. Иркутск [Кушнаренко и др., 2015].

Изменчивость ионосферы от дня ко дню обусловлена рядом факторов, основным из которых является состояние нейтрального газа термосферы. Для средней ионосферы, на высотах которой располагается область F1, основным показателем состояния термосферы является газовый состав, характеризующийся в основном отношением концентраций атомных частиц кислорода к молекулам кислорода и азота. Имеющиеся методы определения основных газовых компонент и отношения атомарного кислорода к молекулярному азоту $[O]/[N_2]$ применимы в основном для высот выше максимума слоя F2 [Mordovskaya et al., 2010; Данилов, 1961].

Влияние газового состава на величину электронной концентрации N и форму профиля высотного распределения $N(h)$ особенно отчетливо проявляется на высотах слоя F1 ниже 200 км, где обычно выполняется условие фотохимического равновесия, поэтому поведение слоя F1 хорошо отражает изменения в газовом составе термосферы [Щепкин и др., 1997, 1998].

Разработанная методика оценки состояния термосферы с использованием данных ионосферных измерений и полуэмпирической модели ионосферы (ПЭМ) [Щепкин и др., 1997] позволяет определять как ежедневные, так и осредненные по длительному периоду, относительные концентрации основных газовых частиц в различных условиях солнечной и геомагнитной активности [Щепкин и др., 2008, 2009] на высотах ниже максимума слоя F1.

В работе исследовалось поведение отношений $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$, полученных по методике авторов, в течение длительного периода спада, минимума и подъема солнечной активности (2003–2013 гг.) на ст. Норильск. Рассмотрены их сезонные изменения.

**МЕТОД И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ
ДАННЫЕ**

Полуэмпирическая модель основана на уравнении регрессии [Щепкин и др., 1998]

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

Таблица 1

Средние отношения $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ во время геомагнитных возмущений и в спокойные дни 2003–2013 гг. на ст. Норильск

Год	F10.7	$[O]/[N_2]$							
		Зима		Весна		Лето		Осень	
		возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.
2003	128	0.210	0.234	0.192	0.206	0.179	0.187	0.170	0.205
2004	106	0.220	0.241	0.207	0.224	0.186	0.192	0.182	0.219
2005	98	0.228	0.237	0.203	0.215	0.181	0.198	0.188	0.210
2006	80	0.218	0.240	0.202	0.224	0.188	0.221	0.195	0.208
2007	74	0.232	0.250	0.189	0.195	0.173	0.189	0.172	0.190
2008	69	0.217	0.227	0.170	0.184	0.154	0.174	0.178	0.183
2009	71	0.221	0.246	0.186	0.209	0.180	0.194	0.203	0.231
2010	80	0.201	0.240	0.187	0.212	0.181	0.190	0.200	0.213
2011	113	0.220	0.255	0.193	0.220	0.185	0.200	0.170	0.182
2012	120	0.230	0.241	0.187	0.202	0.173	0.181	0.186	0.203
2013	123	0.242	0.252	0.217	0.248	0.191	0.208	нет	нет
		$[O_2]/[O]$							
		Зима		Весна		Лето		Осень	
		возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.
2003	128	0.800	0.660	0.606	0.528	0.603	0.512	0.594	0.476
2004	106	0.702	0.592	0.594	0.537	0.617	0.510	0.500	0.461
2005	98	0.696	0.629	0.608	0.499	0.570	0.505	0.534	0.449
2006	80	0.702	0.570	0.630	0.538	0.574	0.549	0.546	0.504
2007	74	0.718	0.577	0.530	0.488	0.556	0.454	0.439	0.418
2008	69	0.677	0.637	0.518	0.483	0.586	0.512	0.474	0.402
2009	71	0.690	0.607	0.537	0.522	0.651	0.570	0.621	0.467
2010	80	0.730	0.690	0.530	0.490	0.528	0.498	0.467	0.400
2011	113	0.665	0.595	0.553	0.478	0.552	0.454	0.546	0.416
2012	120	0.700	0.660	0.527	0.425	0.553	0.490	0.584	0.522
2013	123	0.654	0.609	0.525	0.417	0.493	0.430	нет	нет

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:

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

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 $[O]$, $[O_2]$ и $[N_2]$ — компоненты нейтральной атмосферы, E_0 — значение энергии потока ионизирующего излучения E в максимуме солнечной активности. В расчетах использовалась модель термосферы [Hedin, 1987], модель [Tobiska, Eparvier, 1998] для определения энергии ионизирующего излучения. Значения N получены по измерениям методом вертикального зондирования на ст. Норильск на высотах 120–200 км. По этим данным из выражения (2) можно оценить величины $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$. Процедура расчетов дана в работе [Кушнаренко и др., 2011].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отношения газовых составляющих $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ были рассчитаны для дневных часов 07–18 LT

на высотах ниже максимума слоя F1. Для каждого спокойного и возмущенного дня (возмущенным считался день с $A_p > 10$) оценивалось среднее значение отношения в околополуденные часы 10–14 LT, а затем находилось среднее отношение отдельно для каждого сезона указанных лет. Были проанализированы дни с разными геомагнитными условиями в разные сезоны периода 2003–2013 гг., в который входят годы спада, длительного минимума (2007–2009 гг.) и подъема солнечной активности. В результате исследовано около 400 геомагнитных событий разной интенсивности, а также все спокойные дни для всех сезонов. Значения индексов F10.7, A_p выбирались из базы данных WDC-C2 в Киото [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/]. Полученные отношения $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ показаны в табл. 1.

ОТНОШЕНИЕ $[O_2]/[O]$

Изменение с сезонами средних величин $[O_2]/[O]$ в спокойных условиях 2003–2013 гг. показано на рис. 1, а. В летние сезоны 2003–2007 гг. отношение $[O_2]/[O]$ уменьшается на 17 % в сравнении с начальными значениями в 2003 г., затем в годы минимума $[O_2]/[O]$ увеличивается на 26 % от значений в 2007 г. К концу периода среднее $[O_2]/[O]$ уменьшается на 16 % по отношению к летним значениям 2003 г. Осенние значения $[O_2]/[O]$ являются самыми низкими по всему исследуемому интервалу, причем картина изменения повторяет летнюю. На рис. 1, а ветвь

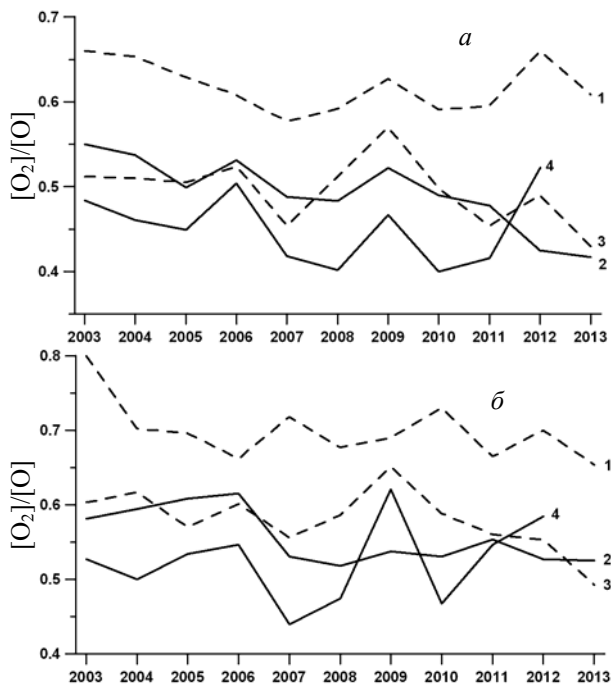


Рис. 1. Долговременные изменения средних значений $[O_2]/[O]$ в спокойных (а) и возмущенных (б) условиях для разных сезонов. Сезоны обозначены цифрами: 1 — зима, 2 — весна, 3 — лето, 4 — осень

изменения $[O_2]/[O]$ в зимние сезоны занимает верхнее положение и средние величины меняются от года к году в пределах 5–15 %. К 2013 г. отношение $[O_2]/[O]$ уменьшилось на 10 % от зимних значений в 2003 г.

Средние отношения $[O_2]/[O]$ в возмущенных условиях (рис. 1, б) превышают спокойные значения во все сезоны по всему периоду на 10–25 %. Для $[O_2]/[O]$, как и в спокойных условиях, характерно увеличение в годы минимума солнечной активности до 15 % в сравнении с 2007 г. К концу периода отношение $[O_2]/[O]$ уменьшается от начальных значений 2003 г.: зимой и летом — на 18 %, весной и осенью — на 13 %.

Таким образом, отношение $[O_2]/[O]$ к концу 2013 г. в спокойных и возмущенных условиях во все сезоны уменьшается на 10–20 % в сравнении со значениями в 2003 г.

ОТНОШЕНИЕ $[O]/[N_2]$

В спокойных и возмущенных условиях ветви зимних значений $[O]/[N_2]$ занимают на рис. 2, а, б самое верхнее положение. Зимние величины $[O]/[N_2]$ по всему периоду показывают небольшие вариации от года к году (5–15 %). В возмущенных условиях средние отношения $[O]/[N_2]$ превышают спокойные значения во все сезоны по всему интервалу лет в пределах 5–20 %.

В спокойных условиях наблюдается некоторое возрастание этого отношения к 2013 г. в сравнении со значениями в 2003 г.: зимой и весной — до 17 %, летом и осенью — до 10 %. Для возмущений также характерно небольшое увеличение $[O]/[N_2]$ к 2013 г.: зимой и весной — на 12 %, летом и осенью — незначительно.

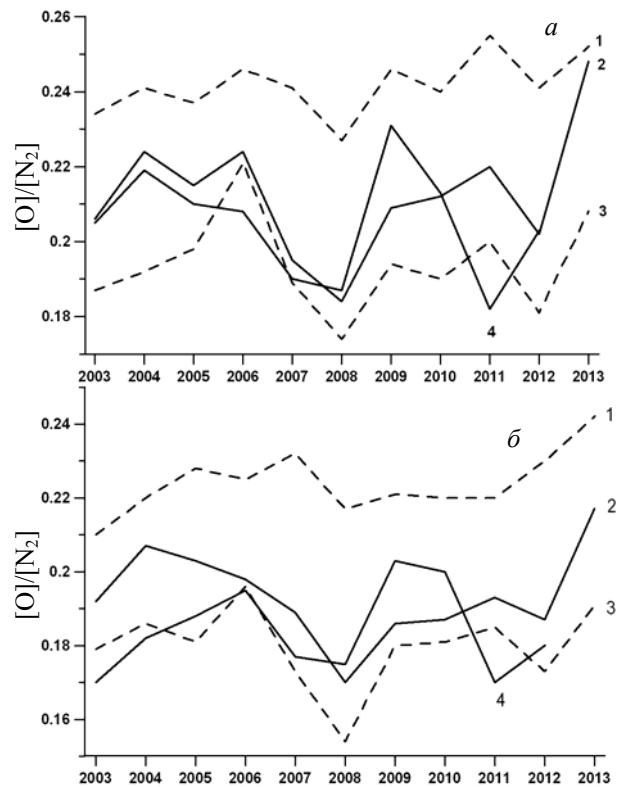


Рис. 2. Долговременные изменения средних значений $[O]/[N_2]$ в спокойных (а) и возмущенных (б) условиях для разных сезонов. Сезоны обозначены цифрами: 1 — зима, 2 — весна, 3 — лето, 4 — осень

В поведении $[O]/[N_2]$ во все сезоны спокойного периода в годы минимума хорошо просматривается провал (уменьшение средних значений относительно максимальных в 2009 г.): осенью — до 20 %, весной и летом — до 15 % и 17 % соответственно. Во время возмущений наблюдаются аналогичные изменения до 15 %. Кроме того, отметим максимальное увеличение значений $[O]/[N_2]$ в осенние сезоны в 2009 и 2010 г. в спокойных и возмущенных условиях. В другие сезоны аналогичное повышение в эти годы не так значительно.

Для отношения $[O]/[N_2]$ характерно некоторое увеличение от 10 до 17 % к 2013 г. в спокойных и возмущенных условиях относительно 2003 г.

СРАВНЕНИЕ ОТНОШЕНИЙ $[O]/[N_2]$

Сравнение с модельными значениями

На основе большого количества данных по N , полученных из экспериментального материала по вертикальному зондированию ионосферы, авторами рассчитаны отношения основных газовых составляющих термосферы $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ для дневных часов (07–18 LT) по всем имеющимся дням (спокойным и возмущенным) для одиннадцати лет рассматриваемого периода. Для сравнения мы выбрали летние сезоны трех лет: 2003 г. — самого возмущенного года, 2007 г. — самого спокойного, 2011 г. — года с возрастающей солнечной активностью. Сравнение проводилось с величинами $[O]/[N_2]$, рассчитанными по модели МСИС-86 [Hedin, 1987] для выбранных

Таблица 2

Отношение $r1 = \{[O]/[N_2]\}_{расч} / \{[O]/[N_2]\}_{МСИС}$ (летние сезоны)											
2003 г. (летние дни)											
возм.	1.00	0.85	0.89	0.96	1.09	0.92	1.11	1.09	0.93	1.08	0.96
спок.	0.84	1.93	1.02	0.94	0.93	1.08	1.02	0.92	1.11	0.99	0.94
2007 г. (летние дни)											
возм.	0.95	1.00	1.01	1.12	1.01	0.95	1.01	1.04	1.01	1.12	1.07
спок.	1.01	1.06	0.99	1.00	1.07	0.98	0.95	1.09	1.08	1.04	1.01
2011 г. (летние дни)											
возм.	1.05	1.01	1.18	1.03	1.06	0.94	1.05	1.04	1.12	1.16	1.03
спок.	0.95	0.98	1.00	0.95	1.07	1.08	1.05	1.07	0.96	1.02	1.01

лет и соответствующих условий. Затем были найдены величины $r1 = \{[O]/[N_2]\}_{расч} / \{[O]/[N_2]\}_{МСИС}$. В качестве примера приведем элемент таблицы (табл. 2) сравнения для нескольких дней летних сезонов указанных выше лет.

Были получены следующие результаты:

- 2003 г. В летний сезон наблюдалось 75 геомагнитно-возмущенных дней и 13 спокойных. В большинстве случаев во время возмущений отличия по абсолютным значениям не превышают 10 %. Меньше, чем в 1/3 случаев возмущенных дней, отклонения от модельных величин находятся в диапазоне 10–20 %. В спокойные дни наблюдались отличия по абсолютной величине меньше 10 %.

- 2007 г. В самый геомагнитно-спокойный год летом наблюдалось 26 возмущенных дней и 65 спокойных. В подавляющем большинстве спокойных дней (51) отличия меньше 10 %, лишь для 15 дней отмечены изменения до 20 %. Для дней с возмущенными геомагнитными условиями отличия также в пределах 10 %.

- 2011 г. В летний сезон этого года довольно много дней с отсутствием измерений. Мы сравнили расчеты по 22 возмущенным и 32 спокойным дням. Было всего 6 случаев в дни возмущений, когда отклонения по абсолютной величине превышали 10 %. Во все остальные дни — и возмущенные и спокойные — отличия были до 10 %.

В подавляющем большинстве случаев проведенного сравнения для спокойных дней летних сезонов выбранных лет отмечается достаточно хорошее соответствие — в пределах ± 10 %. В возмущенные периоды встречаются отличия ± 10 –20 %, в отдельных случаях выше. Это говорит о том, что модель довольно хорошо описывает термосферу над Норильском в спокойных условиях летних сезонов и не всегда корректно — во время возмущений.

Сравнение с экспериментальными значениями по измерениям GUVI

Рассчитанные отношения $[O]/[N_2]$ сравнивались со значениями, полученными по картам, построенным на основе измерений УФ-спектрометра GUVI [<http://guvi.jhuapl.edu/>]. Эти карты обеспечивают дневное глобальное покрытие земной мезосферы и нижней термосферы (высоты 60–180 км). Сравнение было проведено для летних дней со спокойными и геомагнитно-возмущенными условиями для трех выбранных выше лет: 2003, 2007 и 2011 г. Довольно

сложно добиться точности сравнения, поскольку его можно провести лишь качественно по градации цвета на карте. Кроме того, часто отсутствовали измерения (например, в августе 2007 и 2011 г.). Тем не менее, можно отметить вполне приемлемое соответствие наших средних отношений и величин по GUVI в летние сезоны: в 2003 и 2007 г. оценки по GUVI составляют 0.2–0.3, в 2011 г. — 0.1–0.25, что вполне сопоставимо с нашими значениями. Приведем фрагмент таблицы сравнения для нескольких летних дней трех лет (табл. 3).

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ (СТАНЦИИ НОРИЛЬСК И ИРКУТСК)

Расширение и подъем нейтральной атмосферы на авроральных широтах вызывается разогревом во время геомагнитных возмущений. На ионосферных высотах это проявляется в увеличении плотности молекулярных масс $[N_2]$ и $[O_2]$ и уменьшении атомной массы $[O]$, как было показано по результатам спутниковых измерений [Goncharenko et al., 2006]. Расширение нейтральной атмосферы на высоких широтах приводит к значительным изменениям в динамике всей термосферы. Это вызывает направленный к экватору ветер, который переносит изменения в нейтральном составе от полярных 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 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 намного севернее. Это предположение подтверждается сравнением наших оценок отношений $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ по ст. Норильск с аналогичными значениями по ст. Иркутск, полученными ранее [Кушнаренко и др., 2015] за тот же период (2003–2013 гг.) (табл. 4).

Значения средних величин $[O]/[N_2]$ в Иркутске выше на 10–25 %, чем в Норильске (см. табл. 4) во все сезоны всего периода в спокойных условиях. Во время возмущений эти превышения составляют осенью до 35 %, в другие сезоны — до 25 %. В Норильске,

Таблица 3

Сравнение средних отношений $[O]/[N_2]$ со значениями по GUVI

2003 г.			2007 г.			2011 г.		
дата	$[O]/[N_2]$ расч	$[O]/[N_2]$ GUVI	дата	$[O]/[N_2]$ расч	$[O]/[N_2]$ GUVI	дата	$[O]/[N_2]$ расч	$[O]/[N_2]$ GUVI
02.06.	0.177	0.200	7.06.	0.182	0.200	01.06	0.193	0.250
03.06.	0.182	0.200	11.06	0.184	0.200	02.06	0.182	0.250
04.06.	0.193	0.200	14.06.	0.186	0.200	03.06	0.199	0.250
29.06.	0.178	0.200	25.06.	0.184	0.300	04.06	0.202	0.300
30.06.	0.188	0.300	26.06.	0.181	0.300	05.06	0.199	0.200
02.07.	0.186	0.200	27.06.	0.186	0.300	06.06	0.190	0.250
03.07.	0.184	0.200	28.06.	0.174	0.300	07.06	0.213	0.300
04.07.	0.170	0.200	29.06.	0.167	0.200	11.07	0.200	0.250
05.07.	0.175	0.200	01.07.	0.182	0.300	12.07	0.182	0.200
07.07.	0.182	0.200	02.07.	0.193	0.200	13.07	0.174	0.150
23.08.	0.161	0.100	03.07.	0.191	0.200	19.07	0.202	0.200
24.08.	0.174	0.100	05.07.	0.185	0.200	20.07	0.167	0.150
25.08.	0.181	0.200	06.07.	0.183	0.200	22.07	0.177	0.150
26.08.	0.187	0.200	07.07.	0.175	0.200	26.07	0.182	0.200
28.08.	0.164	0.200	08.07.	0.191	0.200	28.07	0.188	0.200
29.08.	0.181	0.200	09.07.	0.171	0.300	29.07	0.180	0.150
30.08.	0.166	0.200	10.07.	0.183	0.300	30.07	0.190	0.150

Таблица 4

Средние отношения в отдельные годы по ст. Иркутск

Год	$F_{10.7}$	$[O]/[N_2]$							
		зима		весна		лето		осень	
		возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.
2003	128	0.195	0.329	0.226	0.232	0.164	0.191	0.252	0.270
2007	74	0.208	0.290	0.235	0.240	0.198	0.208	0.220	0.244
2011	113	0.260	0.278	0.224	0.254	0.193	0.206	0.229	0.253
Год	$F_{10.7}$	$[O_2]/[O]$							
		зима		весна		лето		осень	
		возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.	возм.	спок.
2003	128	0.897	0.423	0.528	0.466	0.805	0.523	0.504	0.442
2007	74	0.479	0.454	0.547	0.500	0.638	0.665	0.506	0.456
2011	113	0.463	0.440	0.512	0.474	0.551	0.505	0.382	0.341

как и в Иркутске, в спокойных и возмущенных условиях самые высокие значения $[O]/[N_2]$ наблюдались в зимние сезоны, самые низкие — летом и осенью — по всему периоду.

Значения отношения $[O_2]/[O]$ превышают величины, полученные в Иркутске, в спокойных и возмущенных условиях зимой — на 30–70 %, осенью — на 10–25 %. Весенние значения $[O_2]/[O]$ в период 2003–2006 г. также выше в Норильске. Летом ситуация обратная — значения в Иркутске выше почти по всему временному интервалу. В Норильске в спокойных и возмущенных условиях самые высокие значения $[O_2]/[O]$ наблюдались в зимние сезоны, самые низкие — осенью. В Иркутске в спокойных и возмущенных условиях самые высокие значения отмечались летом, самые низкие, как и в Норильске, осенью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования отношений $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$, полученных на основе экспериментального материала по результатам вертикального зондирования ионосферы на ст. Норильск в период 2003–2013 гг., позволяют сделать следующие выводы.

1. Отношение $[O_2]/[O]$ в спокойных и в возмущенных условиях к концу 2013 г. уменьшается во все сезоны от 10 до 20 % по отношению к значениям 2003 г.
2. Средние отношения $[O_2]/[O]$ в возмущенных условиях превышают спокойные значения во все сезоны по всему периоду на 10–25 %.
3. Для отношения $[O]/[N_2]$ в спокойных и возмущенных условиях во все сезоны наблюдается некоторое увеличение к 2013 г. (до 17 %) в сравнении со значениями в 2003 г.
4. В спокойных и возмущенных условиях самые высокие значения отношений $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ по всему периоду наблюдались зимой, самые низкие — осенью и летом.
5. В большинстве случаев при сравнении наших оценок $[O]/[N_2]$ с рассчитанными по модели МСИС получено хорошее соответствие: в пределах ± 10 % для спокойных дней летних сезонов выбранных трех лет. В возмущенные периоды отличия составляют ± 10 –20 %. Это говорит о том, что модель довольно хорошо описывает термосферу над Норильском в спокойных условиях летних сезонов.
6. Получено вполне приемлемое соответствие наших средних отношений $[O]/[N_2]$ и аналогичных

значений по GUVI для летних сезонов 2003, 2007 и 2011 г.

7. Результаты сравнения со станцией Иркутск:

- Значения средних величин $[O]/[N_2]$ в спокойных условиях в Норильске на 10–25 % ниже, чем в Иркутске, во все сезоны по всему периоду, а во время возмущений — ниже на 20–35 %.

- Значения отношения $[O_2]/[O]$ в Норильске превышают значения в Иркутске в спокойных и возмущенных условиях зимой — на 30–70 %, осенью — на 10–25 %. Весной с 2003 г. до 2006 г. отношения $[O_2]/[O]$ также выше в Норильске.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Данилов А.Д. О молекулярном азоте в верхней атмосфере // Искусственные спутники Земли. АН СССР. 1961. Вып. 10. С. 98–101.

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. Долговременные изменения в нейтральном газовом составе термосферы над Иркутском // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 4. С. 30–34. DOI: 10.12737/13457.

Щепкин Л.А., Кузнецова Г.М., Кушнаренко Г.П. Оценки относительного содержания атомов и молекул кислорода на высоте 120 км по данным ионосферных измерений // Геомагнетизм и аэронавтика. 2009. Т. 49, № 4. С. 350–353.

Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Возможность оценок относительного содержания атомов и молекул кислорода по данным измерений электронной концентрации в средней ионосфере // Геомагнетизм и аэронавтика. 2008. Т. 48, № 1. С. 129–133.

Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М., Фрейзон И.А. Зависимость параметров средней ионосферы от солнечной и геомагнитной активностей. 1. Степень развития слоя F1 // Геомагнетизм и аэронавтика. 1998. Т. 38, № 5. С. 72–76.

Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Фрейзон И.А., Кузнецова Г.М. Связь электронной концентрации в средней ионосфере с состоянием термосферы // Геомагнетизм и аэронавтика. 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.

Mordovskaya V.G., Ignatyev A.P., Boldyrev S.I., et al. Method of monitoring atomic oxygen and molecular nitrogen composition in the upper atmosphere on XUV images of the Sun // Geomagnetism and Aeronomy. 2010. V. 50, N 5. P. 679–685.

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://guvi.jhuapl.edu/> (дата обращения 10 января 2016 г.).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (дата обращения 10 января 2016 г.).

REFERENCES

Danilov A.D. On the molecular nitrogen in the upper atmosphere. *Iskustvennyye sputniki Zemli. AN SSSR* [Artificial satellites]. 1961, iss. 10, pp. 98–101. (In Russian).

Goncharenko L., Salah J., Crowley G., Goncharenko L., Salah J., Crowley G., Paxton L.J., Zhang Y., Coster A., Rideout W., Huang C., Zhang S., Reinisch B., Taran V. 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, vol. 111, A03303. DOI: 10.1029/2004JA010683.

Hedin A.E. MSIS-86 thermospheric model. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. 92, no. A5, pp. 4649–4662.

Kushnarenko G.P., Kuznetsova G.M., Kolpakova O.E. Estimates of ratios of major gas components during strong and moderate geomagnetic disturbances at descending phase of solar activity and in solar minimum. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2011, vol. 19, pp. 134–139. (In Russian).

Kushnarenko G.P., Yakovleva O.E., Kuznetsova G.M. Long-term variations in neutral gas composition of the thermosphere above Irkutsk. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2015, vol. 1, no. 4, pp. 30–34. (In Russian). DOI: 10.12737/13457.

Mordovskaya V.G., Ignatyev A.P., Boldyrev S.I., Kolomitsev O.P. Method of monitoring atomic oxygen and molecular nitrogen composition in the upper atmosphere on XUV images of the Sun. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2010, vol. 50, no. 5, pp. 679–685.

Shchepkin L.A., Kuznetsova G.M., Kushnarenko G.P. Estimates of the relative abundance of atomic and molecular oxygen at 120 km from ionospheric measurements. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2009, vol. 49, no. 4, pp. 350–353. (In Russian).

Shchepkin L.A., Kushnarenko G.P., Kuznetsova G.M. The possibility of estimating the relative abundance of atomic and molecular oxygen from electron density measurements in the middle ionosphere. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2008, vol. 48, no. 1, pp. 129–133. (In Russian).

Shchepkin L.A., Kushnarenko G.P., Kuznetsova G.M., Freizon I.A. Correlation of the middle ionosphere parameters with solar and geomagnetic activities. 1. The development degree of the F1 layer. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1998, vol. 38, no. 5, pp. 72–76. (In Russian).

Shchepkin L.A., Kushnarenko G.P., Freizon I.A., Kuznetsova G.M. The connection of electron density in the middle ionosphere with thermospheric conditions. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1997, vol. 37, no. 5, pp. 106–113. (In Russian).

Tobiska W.K., Eparvier F.G. EUV97: Improvements to EUV irradiance modeling in the soft X-rays and EUV. *Solar Phys.* 1998, vol. 147, no. 1, pp. 147–159.

URL: <http://guvi.jhuapl.edu/> (accessed January 10, 2016).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (accessed January 10, 2016).