

**АТМОСФЕРА НАД НОРИЛЬСКОМ НИЖЕ 200 км
В УСЛОВИЯХ МИНИМУМА И МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**
**THE ATMOSPHERE BELOW 200 km OVER NORILSK
AT SOLAR MINIMUM AND MAXIMUM**

О.Е. Яковлева*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, yakovleva@iszf.irk.ru***Г.П. Кушнаренко***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kusch@iszf.irk.ru***Г.М. Кузнецова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kuz@iszf.irk.ru***O.E. Yakovleva***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, yakovleva@iszf.irk.ru***G.P. Kushnarenko***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kusch@iszf.irk.ru***G.M. Kuznetsova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kuz@iszf.irk.ru*

Аннотация. Получены оценки сезонных изменений относительных величин основных газовых составляющих термосферы $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ в год максимума солнечной активности. Для оценок использовались методика авторов и результаты измерений Норильским дигизондом (69.4° N, 88.1° E) на высотах ионосферного слоя F1 (120–200 км) в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях. Отношения $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ в год максимума солнечной активности сравнивались с соответствующими величинами для Норильска в период длительного минимума (2007–2009 гг.). Обнаружено, что относительное содержание атомарного кислорода увеличивается в условиях максимума более чем на 35 % зимой и осенью в спокойные и возмущенные дни. Весной и летом атмосфера на 20 % обогащается молекулярным кислородом и в спокойные, и в возмущенные дни максимума относительно минимума.

Ключевые слова: отношения газовых составляющих, геомагнитные возмущения.

Abstract. We have obtained seasonal variations in relative values of the main thermospheric gas components $[O]/[N_2]$ and $[O_2]/[O]$ during solar maximum. We have used our method and measurements made with the Norilsk digisonde (69.4° N, 88.1° E) at heights of the ionospheric layer F1 (120–200 km) in quiet and disturbed geomagnetic conditions. We have compared $[O]/[N_2]$ and $[O_2]/[O]$ ratios during solar maximum with the corresponding values for the long period of solar minimum (2007–2009) in Norilsk. The relative content of atomic oxygen particles has been found to increase during solar maximum by more than 35 % in winter and autumn on quiet and disturbed days. In spring and summer, the atmosphere is enriched with molecular oxygen particles by 20 % both on quiet and disturbed days of solar maximum as compared to the conditions of solar minimum.

Keywords: gas component ratios, geomagnetic disturbances.

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения нейтральных газовых составляющих термосферы для различных гелио- и геофизических условий с помощью ионосферных измерений не потеряла актуальности и в настоящее время. Использование в нашей методике данных регулярных измерений методом вертикального зондирования ионосферы позволяет отслеживать состояние термосферы в определенные моменты.

Газовый состав на высотах, где располагается область F1 ионосферы, характеризуется в основном соотношением атомов кислорода и молекул кислорода и азота. Влияние газового состава на электронную концентрацию N_e и форму профиля $N(h)$ особенно отчетливо проявляется на высотах ниже 200 км, где обычно в дневные часы выполняется условие фотохимического равновесия. Это позволяет с помощью полумпирической модели (ПЭМ) [Щепкин и др., 1997] описать связь N_e с газовым составом термосферы, ее температурой и потоком солнечного излучения. Ранее по результатам регулярных измере-

ний с использованием ПЭМ были получены отношения $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ на высотах 120–200 км в период длительного минимума солнечной активности 2007–2009 гг. по известной авторской методике [Кушнаренко и др., 2011, 2014; Яковлева и др., 2015]. Благодаря накоплению необходимых данных по измерениям с помощью дигизонда на ст. «Норильск», появилась возможность провести расчеты и для других условий солнечной активности. Представляем наши оценки отношений $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ на высотах 120–200 км для максимума солнечной активности. Отношения получены для дневных часов (7–18 LT) в разных геомагнитных условиях. Проведено сравнение с соответствующими величинами для минимума солнечной активности.

МЕТОД И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Полумпирическая модель основана на уравнении регрессии:

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

Здесь N_e — электронная концентрация; N_{av} — среднее значение N_e по всему объему данных отдельно для каждой высоты; X_j — коэффициенты уравнения модели; n_1, n_2, n_3 — концентрации атомарного кислорода и молекулярных кислорода и азота соответственно; χ — зенитный угол Солнца; T_{ex} — температура экзосферы; E_0 — энергия ионизирующего излучения E в максимуме солнечной активности. Уравнение (1) можно записать в следующем виде:

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

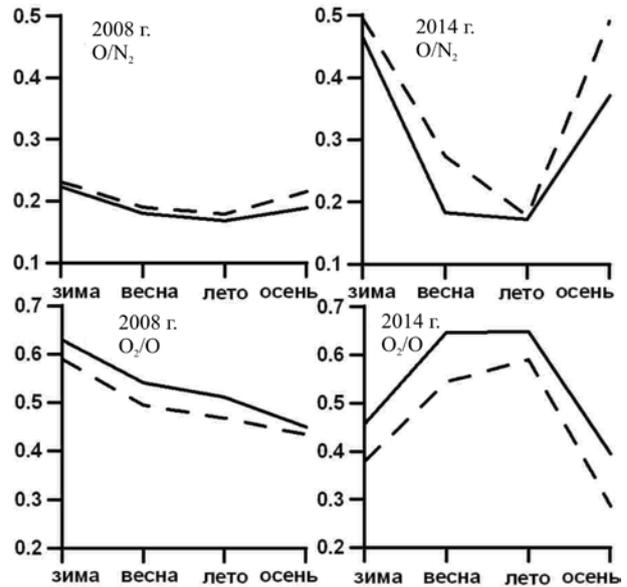
Здесь $R = [O]/[N_2]$; $W = [1/(1+5R_2)]^{1.5}$; $R_2 = [O_2]/[N_2]$; $R_2/R = [O_2]/[O]$, где $[O]$, $[O_2]$ и $[N_2]$ — концентрации атомов кислорода и молекул кислорода и азота соответственно. При расчетах использовались модели термосферы [Hedin, 1987; Picone et al., 2002] и модель [Tobiska, Eparvier, 1998] для определения энергии ионизирующего излучения. Значения N_e брались по результатам измерений Норильским дигизондом в дневные часы на высотах 120–200 км. По этим значениям N_e рассчитывались коэффициенты ПЭМ для каждой высоты интервала 120–200 км и для каждого конкретного периода исследования (минимум, максимум, промежуточный период солнечной активности). В качестве примера приведем использованную в расчетах таблицу коэффициентов для минимума солнечной активности (табл. 1).

В табл. 1 $R_{\text{ср}}$ — коэффициенты корреляции между массивами рассчитанных и экспериментальных значений N_e для этого периода (в процедуре расчетов коэффициентов ПЭМ).

Рассчитанные коэффициенты модели для разных периодов позволяют нам говорить о привязке полученных по ним результатов к высотному интервалу 120–200 км. Из выражения (2) по этим данным можно определить величины $R, R_2, R_2/R$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Описанный метод позволяет оценить отношения газовых составляющих $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ на высотах 120–200 км в дневные часы (7–18 LT). В расчетах используются данные по электронной концентрации на указанных высотах, полученные из измерений Норильским дигизондом (69.4° N, 88.1° E). Для исследования выбирались дни со спокойными и возмущенными геомагнитными условиями во все сезоны 2014 г. — года максимума солнечной активности. Возмущенными считались дни с геомагнитным индексом $A_p > 10$. 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 мы счи-



Средние отношения $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ в годы минимума (левая панель, 2008 г.) и максимума (правая панель, 2014 г.) солнечной активности. Штриховыми кривыми показаны изменения в спокойных условиях

тали средние величины $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ за околополуденные часы (10–14 LT) и находили средние значения отдельно для каждого сезона, а затем для последних отношений рассчитывали среднеквадратичное отклонение σ . Результаты показаны в табл. 2. Для сравнения здесь же приведены оценки $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ для 2008 г., одного из трех годов длительного минимума солнечной активности.

Более наглядно наши оценки отношений показаны на рисунке, построенном по данным из табл. 2.

Отношение $[O]/[N_2]$

Отношение $[O]/[N_2]$ во все сезоны минимума солнечной активности показывает незначительное (6–12 %) уменьшение при переходе от спокойных условий к возмущенным. Причина, возможно, в том, что рассматривались слабые геомагнитные возмущения, поскольку период последнего солнечного минимума 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 % как в возмущенные, так и в спокойные дни во все три года минимума.

В максимуме солнечной активности, как и в минимуме, отношение $[O]/[N_2]$ имеет наибольшие значения зимой и наименьшие — летом. Однако в максимуме солнечной активности при переходе от зимы к лету и наоборот отношение $[O]/[N_2]$ изменяется в 2.7 раза и в спокойные, и в возмущенные дни, что намного превышает аналогичную величину в условиях минимума. Объясняется это, по-видимому, аномально низким уровнем солнечного EUV-излучения в последнем минимуме: измерения показали уменьшение энергии на 15 % в сравнении с предыдущими двумя минимумами солнечной активности [Solomon et al., 2010]. Поскольку EUV-излучение контролирует температуру и плотность термосферы, в минимуме последнего солнечного цикла термосфера была необычно холодной, а ионосфера — ниже и прохлад-

Таблица 1

Коэффициенты полуэмпирической модели (ПЭМ) для минимума солнечной активности

высота	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	R_{corr}	N_{av}
120	-0.1844	-7.403	4.842	0.0000	0.9708	0.935	7.51
130	-0.4140	-7.960	5.459	0.2335	0.9473	0.904	8.57
140	-0.3128	-8.238	5.310	0.2341	0.7888	0.941	10.25
150	-0.3352	-7.917	5.106	0.4142	0.7005	0.950	12.07
160	-0.3521	-7.048	4.688	0.5798	0.7009	0.958	13.80
170	-0.3646	-5.463	4.130	0.7145	0.7496	0.960	15.39
180	-0.3462	-2.644	3.430	0.7984	0.7455	0.936	17.16
190	-0.3267	1.388	2.659	0.8516	0.7008	0.832	19.49
200	-0.3604	5.298	1.983	0.9051	0.7580	0.697	22.32

Таблица 2

Средние отношения $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ в максимуме и минимуме солнечной активности (Норильск)

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
σ , 2008		0.035	0.029	0.013	0.012	0.016	0.019	0.021	0.022
2014	146	0.467	0.496	0.193	0.274	0.162	0.178	0.370	0.490
σ , 2014		0.083	0.121	0.029	0.090	0.033	0.041	0.109	0.153
		$[O_2]/[O]$							
2008	69	0.630	0.590	0.541	0.495	0.512	0.468	0.450	0.432
σ , 2008		0.111	0.094	0.028	0.025	0.050	0.039	0.051	0.057
2014	146	0.456	0.379	0.637	0.534	0.678	0.536	0.397	0.288
σ , 2014		0.103	0.109	0.071	0.079	0.217	0.204	0.179	0.119

нее в сравнении с аналогичными условиями в прошлом, что и подтвердили спутниковые измерения [Emmert et al., 2010].

При сравнении спокойных и возмущенных геомагнитных условий в максимуме солнечной активности в зимний и летний сезоны отмечаются незначительные изменения (3–6 %) значений $[O]/[N_2]$, тогда как весной и осенью изменения $[O]/[N_2]$ могут достигать 35 и 25 % соответственно. Возможно, за это ответственны более возмущенные геомагнитные условия в равноденственные периоды. Отношение $[O]/[N_2]$ весной увеличивается на 25 % в геомагнитно-спокойные дни, но почти не меняется в возмущенные дни, так же как и в летний период. Значительное возрастание значений $[O]/[N_2]$ наблюдается осенью: на 56 % в спокойные дни и на 50 % в возмущенные. Зимой увеличение составляет порядка 50 % и в спокойный, и в возмущенный период.

Отношение $[O_2]/[O]$

В условиях минимума солнечной активности наибольшие значения $[O_2]/[O]$ наблюдаются зимой как в спокойных, так и в возмущенных условиях, минимальные — осенью. В максимуме солнечной активности наибольшие значения $[O_2]/[O]$ отмечаются летом и весной, наименьшие — осенью. В сравнении со спокойными днями значения $[O_2]/[O]$ увеличиваются во время геомагнитных возмущений во все сезоны и в максимуме, и в минимуме солнечной

активности, причем в минимуме это изменение достигает 10 %. В период максимума увеличение отношения $[O_2]/[O]$ в возмущенные дни значительно: зимой и весной — 17 %, осенью — 28 %, лишь летом — 10 %. По-видимому, здесь оказывают свое влияние более возмущенные геомагнитные условия в максимуме солнечной активности.

Отметим, что в максимуме солнечной активности по сравнению с ее минимумом величины $[O_2]/[O]$ зимой в спокойных и возмущенных условиях, а также в геомагнитно-спокойные дни осени могут уменьшиться на 35 %. Весной же в спокойных и возмущенных условиях отношение $[O_2]/[O]$ увеличивается до 15 %, летом — до 20 % в сравнении с минимумом.

СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ОЦЕНОК ОТНОШЕНИЙ

Сравнение с модельными значениями

На основе большого количества данных по N_e , полученных из экспериментального материала по вертикальному зондированию ионосферы (Норильск), ранее нами были рассчитаны отношения $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ для дневных часов (7–18 LT) по всем имеющимся дням (спокойным и возмущенным) для одиннадцати лет с 2003 по 2013 г. [Кушнarenко и др., 2016]. В указанной работе проводилось сравнение с отношениями $[O]/[N_2]$, полученными по модели термосферы МСИС для нескольких

Таблица 3

Величины $r_1 = ([O]/[N_2])_{расч} / ([O]/[N_2])_{МСИС}$

дни	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	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	1.10

выбранных лет. В качестве примера выберем летний сезон для года минимума солнечной активности и приведем элемент таблицы сравнения (табл. 3) величины $r_1 = ([O]/[N_2])_{расч} / ([O]/[N_2])_{МСИС}$ для нескольких летних дней 2007 г. [Кушнаренко и др., 2016].

В подавляющем большинстве случаев для спокойных летних дней отмечалось достаточно хорошее соответствие величинам по МСИС — разница в пределах $\pm 10\%$. В возмущенные периоды разница может достигать $\pm 10\text{--}20\%$, в отдельных случаях даже больше. Эти результаты относятся и к другим годам, для которых проводилось сравнение. Можно сделать вывод о том, что рабочая модель довольно хорошо описывает термосферу над Норильском в геомагнитно-спокойных условиях летних сезонов и не всегда корректно — во время геомагнитных возмущений, особенно значительных.

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://guvitimed.jhuapl.edu>]. Эти карты обеспечивают глобальное покрытие земной мезосферы и нижней термосферы (высоты 60–180 км) в дневное время. В период минимума солнечной активности наши оценки $[O]/[N_2]$ (табл. 2) в разумных пределах сопоставимы со значениями по GUVI для весенних и летних сезонов, которые составляют 0.1–0.3. Осенью и зимой соответствие имеет место в отдельных случаях. По-видимому, используемые в нашем методе модели термосферы не во все сезоны верно описывают газовый состав в регионе Норильска. Для максимума солнечной активности сравнение вполне соответствует нашим оценкам: величины по GUVI в весенний и летний периоды составляют от 0.2 до 0.3. Осенние значения 0.5 по GUVI также отвечают нашим значениям $[O]/[N_2]$ (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В минимуме солнечной активности во все сезоны величины $[O]/[N_2]$ незначительно уменьшаются (6–12 %) при переходе от геомагнитно-спокойных условий к возмущенным.

2. В минимуме и в максимуме солнечной активности отношение $[O]/[N_2]$ максимально зимой и минимально летом. В период максимума солнечной активности и в спокойные, и в возмущенные дни величины $[O]/[N_2]$ могут изменяться от одного сезона к другому в 2.7 раза, что намного превышает аналогичные изменения в период минимума.

3. В максимуме солнечной активности переход от спокойных условий к возмущенным в зимний и летний периоды характеризуется слабым уменьше-

нием (3–6 %) величин $[O]/[N_2]$, тогда как в весенний и осенний периоды это уменьшение может достигать 35 % и 25 % соответственно.

4. В максимуме солнечной активности наибольшие значения $[O_2]/[O]$ наблюдаются летом и весной, наименьшие — осенью. Во время геомагнитных возмущений значения $[O_2]/[O]$ увеличиваются во все сезоны как в максимуме, так и в минимуме солнечной активности. В период минимума это изменение находится в пределах 10 % во все сезоны, в максимуме возрастание значительнее: зимой и весной — до 17 %, осенью — 28 %, однако летом оно по-прежнему находится в пределах 10 %.

5. Сезонные изменения отношений $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ на высотах ниже 200 км в максимуме солнечной активности по сравнению с минимумом таковы:

5.1. И в спокойные, и в возмущенные дни отношение $[O]/[N_2]$ увеличивается более чем на 50 % зимой и осенью и слабо меняется весной и летом.

5.2. Отношение $[O_2]/[O]$ зимой и осенью уменьшается до 35 %, а весной и летом увеличивается на 15–20 % и в спокойные, и в возмущенные дни.

6. Достоверность обсуждаемым оценкам придает использование в нашем методе экспериментальных данных по электронной концентрации, полученных из результатов метода вертикального зондирования ионосферы над Норильском, и вполне разумное соответствие данным GUVI.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 (проект П.16.1.1 «Исследование влияния солнечной активности и процессов в нижней атмосфере на изменения термодинамических характеристик атмосферы, Мирового океана и климата»). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М., Колпакова О.Е. Оценка 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.

Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Долговременные изменения в нейтральном газовом составе термосферы над Норильском (2003–2013 гг.) // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 92–97. DOI: [10.12737/21465](https://doi.org/10.12737/21465).

Щепкин Л.А., Кушнаренко 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.

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 ст. «Норильск» // Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2015. С. 209–211.

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://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 31 января 2020 г.).

URL: <http://guvitimed.jhuapl.edu> (дата обращения 31 января 2020 г.).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 31 января 2020 г.).

REFERENCES

Belov A.V., Gaidash S.P. Anomalous low solar and geomagnetic activities in 2007. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2009, vol. 49, no. 5, pp. 595–602. (In Russian).

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

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. Estimations of ratios of dominant gas components during strong and moderate geomagnetic disturbances in periods of solar activity decay and minimum. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2011, iss. 19, pp. 134–139. (In Russian).

Kushnarenko G.P., Yakovleva O.E., Kuznetsova G.M. Seasonal variations in ratios of main gas components of thermosphere in the solar activity last minimum (2007–2009). *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2014, iss. 25, pp. 29–32. (In Russian).

Kushnarenko G.P., Yakovleva O.E., Kuznetsova G.M. Long-term variations in the neutral gas composition of the thermosphere above Norilsk (2003–2013 гг.). *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2016, vol. 2, no. 4, pp. 118–125. DOI: [10.12737/24278](https://doi.org/10.12737/24278).

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, vol. 107, no. A12, p. 1469. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).

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

Solomon S.C., Woods T.N., Didkovsky L.V., Emmert J.T., Qian L. Anomalous low solar extreme ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum. *Geophys. Res. Lett.* 2010, vol. 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, vol. 147, no. 1, pp. 147–159.

Yakovleva O.E., Kushnarenko G.P., Kuznetsova G.M. The main gas components of the thermosphere $[O]/[N_2]$ and $[O_2]/[O]$ in the years of minimum solar activity (2007–2009) at the station Norilsk. *Trudy Mezhdunarodnoi Baykalskoi molodezhnoi nauchnoi shkoly po fundamentalnoi fizike i konferentsii molodykh uchenykh "Vzaimodeystvie poлей i izlucheniya s veshchestvom"* [Proceedings of Baikal Young Scientist's International School on Fundamental Physics and Young Scientist's Conference "Interaction of Fields and Radiation with Matter"]. Irkutsk, 2015, pp. 209–211. (In Russian).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (accessed at January 31, 2020).

URL: <http://guvitimed.jhuapl.edu> (accessed at January 31, 2020).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (accessed at January 31, 2020).

Как цитировать эту статью:

Яковлева О.Е., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Атмосфера над Норильском ниже 200 км в условиях минимума и максимума солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 3. С. 105–109. DOI: [10.12737/szf-63202012](https://doi.org/10.12737/szf-63202012).