

УДК 350.338.2.550.385

ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ГАЗОВОГО СОСТАВА ТЕРМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ИРКУТСКОГО ДИГИЗОНДА

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

ESTIMATING OF RELATIVE CONCENTRATIONS OF THERMOSPHERIC GAS COMPOSITION USING IRKUTSK DIGITAL IONOSONDE MEASUREMENTS

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

На основе предложенной методики оценки отношений концентрации атомов кислорода и молекул азота, молекул и атомов кислорода [1] при использовании данных ионосферных измерений проводится анализ этих отношений для различных условий: для разной геомагнитной обстановки, разных сезонов. Оценки относятся к опорному уровню термосферы 120 км, используются данные по электронной концентрации, полученной на высотах 120–200 км с помощью регулярных измерений на Иркутском цифровом ионозонде в Институте солнечно-земной физики в 2003–2006 гг.

The proposed method for estimating relations between oxygen atoms and nitrogen molecules, oxygen molecules and atoms [1] and ionospheric measurement data are applied to analyze these relations for different conditions: different seasons and geomagnetic situation. Estimations are related to the reference level of the upper thermosphere (120 km). We use data on electron density obtained by regular measurements with the digital ionosonde of ISTP RAS SB, Irkutsk, at altitudes of 120–200 km in 2003–2006.

Введение

В предлагаемом докладе проводится оценка относительных газовых составляющих термосферы по данным ионосферных измерений. В настоящее время для аэрономических расчетов широко используется модель MSIS-86 [2]. В большинстве случаев модель хорошо описывает состояние нейтрального газа, однако следует отметить, что она построена на базе спутниковых и ракетных измерений, а также измерений методом некогерентного рассеяния радиоволн, полученных в 60–70-х годах XX века. За прошедшие с тех пор десятилетия не проводилось столь масштабных и систематических масс-спектрометрических измерений. Отметим, что данные о газовом составе получены по измерениям на спутниковых орбитах, в основном выше 250 км. Вариации же состава на базовом уровне термосферы 120 км получены путем экстраполяции. Следует также учесть, что в ряде случаев требуются существенные коррекции концентраций нейтральных газовых частиц из модели термосферы, чтобы согласовать результаты аэрономических расчетов с экспериментальными данными.

В отмеченных выше условиях очень актуально использование данных регулярных измерений методом вертикального зондирования ионосферы в методике оценок состояния термосферы. Регулярные, почти ежедневные, данные по профилям $N(h)$ имеют в Институте солнечно-земной физики СО РАН в Иркутске, начиная с конца 2002 г. В случае разработки надежной методики появится возможность отслеживать состояние термосферы в настоящее время. Решение такой задачи весьма полезно и для развития аэрономических моделей ионосферы. Авторы располагают полуэмпирической моделью ионосферы (ПЭМ) [3], описывающей связь N на высотах 120–200 км с характеристиками нейтрального газа термосферы и индексом солнечной активности. С помощью ПЭМ можно оценивать как ежедневные, так и осредненные по длительному периоду, например за сезон года, относительные концентрации основных газовых частиц. Это позволяет делать форма

уравнения регрессии ПЭМ.

В работе приводятся результаты оценок относительных величин атомного и молекулярного кислорода $R_1 = [O]/[N_2]$, $R_2 = [O_2]/[N_2]$ и $R_3 = [O_2]/[O]$ для спокойных дней 4-х сезонов 2006 г. и для трех возмущенных дней в апреле 2006 г. Впервые для этих дней приведены значения для дневного периода (7:00–18:00 LT). Проводится сравнение полученных величин с модельными значениями.

Оцениваются также межсуточные вариации R_1 , R_2 и R_3 для околополуденных часов на высоте 120 км, которая считается опорным уровнем верхней термосферы во всех современных ее моделях. В таблице приводятся значения относительных величин атомного и молекулярного кислорода для периода 1–20 апреля 2006 г.

Описание метода оценки и используемые данные

Уравнение полуэмпирической модели ионосферы (ПЭМ) [2] может быть записано в форме:

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

Здесь N – электронная концентрация. Величина N_{av} определяет среднее значение N по всему объему использованных данных отдельно для каждой высоты. X_j – искомые коэффициенты уравнения, n_1 , n_2 , n_3 – концентрации частиц атомного кислорода, молекул кислорода и азота соответственно, на 120 км в модели термосферы [2]. T_{ex} – температура экзосферы, χ – зенитный угол Солнца. Член $X_5 (E/E_0)$ показывает зависимость от относительной величины энергии потока ионизирующего излучения в диапазоне 5–105 нм по модели спектрального распределения интенсивности ультрафиолетового излучения Солнца [4]. E_0 – величина E при максимуме солнечной активности, когда $F10.7 = 250$.

Коэффициенты уравнения (1) были получены с помощью модели термосферы [2] для определения n_j , T_{ex} и при использовании экспериментальных дан-

ных по N , полученных на Иркутском дигизонде по наблюдениям методом вертикального зондирования ионосферы в 2003–2006 гг. Эти же измерения N для полудня на высотах 120, 130, ..., 190, 220 км использовались для проведения оценок относительных газовых составляющих.

Полученная модель многократно использовалась для сравнения расчетных и экспериментальных данных по N на разных ионосферных станциях, при различных уровнях солнечной активности, для разных сезонов [5, 6]. Сравнение показывало в большинстве случаев хорошее и удовлетворительное согласие: расхождения обычно лежали в пределах 20 %, по большей части не превышая 10 %.

Уравнение (1) может быть записано 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 $R = ([O]/[N_2])$; $W = [1/(1+5R_2)]^{1.5}$, $R_2 = [O_2]/[N_2]$, затем можно определить и $R_2/R = [O_2]/[O]$. Величины R , R_2 , R_2/R из выражения (2) можно оценить, если имеются данные по N в рассматриваемом диапазоне высот 120–200 км. Здесь в дневное время в большинстве случаев хорошо выполняется условие фотохимического равновесия, что и позволяет использовать приведенные выражения (1) и (2) для решения поставленной обратной задачи. Следует подчеркнуть, что поскольку в формуле (2) величины R и R_2 относятся к высоте 120 км, мы их можем оценить именно для опорного уровня термосферы, используя N на других высотах. Процедура вычислений подробно описана в работе [7].

Результаты оценки относительных газовых составляющих для периода 2006 г.

а) Спокойные условия

Нами были выбраны спокойные в геомагнитном отношении дни ($A_p < 12$) для каждого из всех 4-х сезонов 2006 г. Оценки были выполнены по нашей методике с использованием ионосферных данных по электронной концентрации, полученных с помощью Иркутского дигизонда на высотах 120–200 км, и коэффициентов уравнения регрессии (2), определенных по этим значениям N . На рис. 1 представлены средние за несколько дней для всех сезонов значения относительных концентраций атомного и молекулярного кислорода $R_1 = [O]/[N_2]$ и $R_3 = [O_2]/[O]$, определенные для опорного уровня термосферы 120 км. Впервые показаны изменения R_1 и R_3 в дневное время (7:00–18:00 LT) в зависимости от сезона. В зимний период временной интервал меньше – 9:00–15:00. Отметим, что со временем дня R_1 меняется очень мало во все сезоны, наибольшие его величины приходится на зимний период, постепенно уменьшаясь к весне и лету и вновь увеличиваясь к осени. Значения отношения $[O]/[N_2]$ за околополуденный период (10:00–14:00 LT) для зимы, весны, лета и осени соответственно таковы: 0.26; 0.22; 0.19; 0.23.

Поведение другого отношения $[O_2]/[O]$ несколько иное: оно меняется с течением дня, обнаруживая

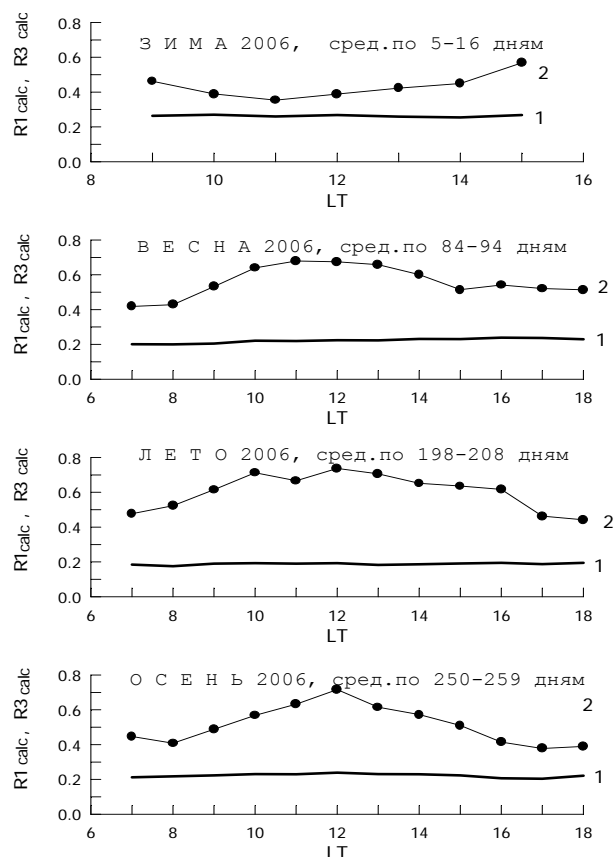


Рис. 1. Отношения $R_1 = [O]/[N_2]$ и $R_3 = [O_2]/[O]$, средние за несколько спокойных дней ($A_p < 10$) каждого сезона 2006 г.: зима (5–16) дни; весна (84–94) дни; лето (198–208) дни; осень (250–259) дни года. Высота 120 км.

максимальные значения в околополуденный период, лишь зимой нет максимума в полдень, и значения постепенно увеличиваются после 11:00. Можно отметить, что минимальные значения R_3 в годовом ходе приходится на зимний сезон, увеличиваясь к весне и лету и вновь уменьшаясь осенью: значения $[O_2]/[O]$ за околополуденный период (10:00–14:00 LT) для зимы, весны, лета и осени, соответственно: 0.40; 0.65; 0.70; 0.62.

Представляет интерес сравнение полученных оценок R_{1calc} и R_{3calc} с аналогичными величинами из модели термосферы [2]. С этой целью введем в рассмотрение относительные величины r_1 и r_3 :

$$r_1 = R_{1calc} / R_{1MSIS}, \quad r_3 = R_{3calc} / R_{3MSIS}.$$

В течение рассматриваемых спокойных дней разных сезонов 2006 г. наши оценки отношения $[O]/[N_2]$ отличаются от значений по модели в пределах 10 % ($0.9 < r_1 < 1.0$), лишь весной в утренние часы различие около 20 %.

Отличия оценок величин отношения $[O_2]/[O]$ от модельных больше: зимой они ниже на 10–20 %, в остальные сезоны наши значения утром и вечером ниже модельных на 15–30 %, а в дневные часы выше на 20–30 %. Можно предположить, что необходима коррекция модельных значений для определенных условий нашего региона.

б) Возмущенные геомагнитные условия

Для анализа поведения оцениваемых нами величин R_1 и R_3 в возмущенный период был взят апрель

2006 г. В этом месяце наблюдались умеренные по своей интенсивности возмущения (значения A_p достигали 67). Были выбраны 3 возмущенных дня: 5 апреля ($A_p=27$); 9 апреля ($A_p=40$) и 14 апреля ($A_p=67$).

На рис. 2 показано поведение отношений $R_1 = [O]/[N_2]$ и $R_3 = [O_2]/[O]$ в дневной период для этих трех дней апреля. Оценки проведены для высоты 120 км. Отметим, что возмущение почти не повлияло на среднесуточные значения отношений R_1 : 5, 9 и 14 апреля их значения равны 0.22; 0.23; 0.20. Для спокойных дней весеннего сезона (апреля) оно составляет 0.22.

Среднесуточные значения R_3 в период 10:00÷14:00 LT несколько увеличились в сравнении со спокойными днями: 5, 9 и 14 апреля эти величины равны 0.68; 0.62; 0.72, соответственно. В спокойный период весны, 10:00÷14:00 LT, $R_3 = 0.65$.

Сравнение с модельными значениями показывают отличия в величинах R_1 в пределах 10 % во все возмущенные дни апреля. Для значений R_3 наши оценки отличаются от модельных в пределах 10–30 %, в утренние часы иногда больше.

В работе [7] отмечалось, что межсуточные вариации A_p в слабовозмущенных условиях вызывают хорошо выраженные изменения в ионосфере на высотах области F1. Это позволило предположить, что важным, а может быть и главным фактором межсуточной изменчивости газового состава термосферы и связанных с ней вариаций характеристик средней ионосферы является геомагнитная активность. В нашей работе,

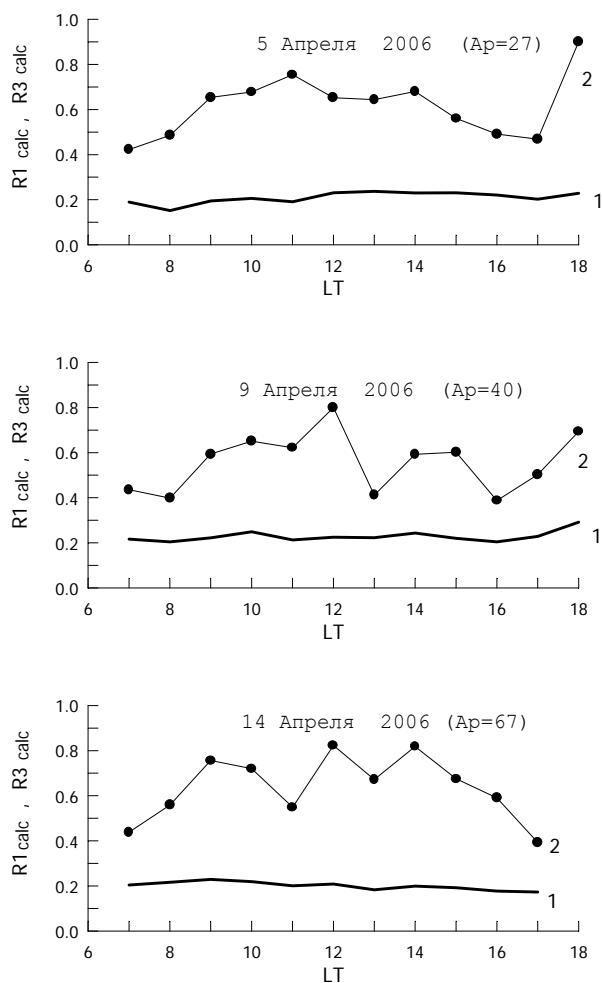


Рис. 2. Отношения $R_1 = [O]/[N_2]$ и $R_3 = [O_2]/[O]$ для 3-х возмущенных дней апреля 2006 г. (высота 120 км).

решая обратную задачу, мы пытаемся проследить, как отвечают оценки отношений атомного и молекулярного кислорода на изменения геомагнитных условий.

В таблице представлены оцененные для высоты 120 км полуденные величины относительных концентраций R_1 и R_3 для всего рассматриваемого периода апреля 2006 г., включающего спокойные и возмущенные дни. Для этих же дней даны и значения $r_1 = R_{1\text{calc}} / R_{1\text{MSIS}}$, $r_3 = R_{3\text{calc}} / R_{3\text{MSIS}}$. Здесь же приведены среднесуточные величины A_p .

Из таблицы видно, что полуденная величина $R_1 = [O]/[N_2]$ откликается на возмущение небольшим понижением: на 17, 16 и 25 % для дней 5, 9 и 14 апреля соответственно. Оценка отношения $R_3 = [O_2]/[O]$ показывает увеличение в эти дни на 15, 23 и 35 % соответственно, в сравнении со значениями в ближайшие спокойные дни. Таким образом, можно отметить, что связь этих отношений с индексом возмущения A_p выражена на рассматриваемой высоте не столь заметно, как было отмечено в работе [8] при анализе апрельских возмущений 2005 г., когда индекс A_p менялся в течение месяца примерно таким же образом, как в рассматриваемом случае.

Оценки отношений $[O]/[N_2]$ и $[O_2]/[O]$ и величины r_1 и r_3 для апреля 2006 г. (полдень, высота 120 км).

Дата	A_p	$R_{1\text{calc}} = O/N_2$	$r_1 = R_{1\text{calc}}/R_{1\text{MSIS}}$	$R_{3\text{calc}} = O_2/O$	$r_3 = R_{3\text{calc}}/R_{3\text{MSIS}}$
01.04.2006	2	0.21	0.84	0.49	1.00
02.04.2006	2	0.20	0.80	0.53	1.08
03.04.2006	2	0.24	0.95	0.49	1.26
04.04.2006	7	0.23	0.96	0.67	1.29
05.04.2006	27	0.19	0.84	0.76	1.20
06.04.2006	13	0.23	1.00	0.70	1.19
07.04.2006	2	0.24	1.00	0.70	1.39
08.04.2006	3	0.25	1.03	0.61	1.22
09.04.2006	40	0.21	1.00	0.75	1.21
10.04.2006	15	0.25	1.13	0.57	0.94
11.04.2006	5	0.25	1.04	0.58	1.02
12.04.2006	2	0.25	1.05	0.59	1.19
13.04.2006	14	0.20	0.90	0.36	0.70
14.04.2006	67	0.19	0.90	0.79	1.11
15.04.2006	24	0.20	0.95	0.72	1.09
16.04.2006	10	0.21	0.96	0.82	1.40
17.04.2006	5	0.21	0.90	0.64	1.19
18.04.2006	6	0.23	1.00	0.39	0.74
19.04.2006	4	0.21	0.90	0.48	0.94
20.04.2006	4	0.23	1.00	0.78	1.14

Для сравнения наших оценок с модельными значениями используем величины, определенные выше, r_1 и r_3 . В случае отношения $[O]/[N_2]$ r_1 в течение всего рассматриваемого периода меняется так: $0.9 < r_1 < 1.1$, т. е. значения R_1 отличаются от модельных в пределах 10 %, лишь в 2-х случаях отличие составляет 15 и 20 %.

Величина оцененного отношения $[O_2]/[O]$ выше значений R_3 по модели, в большинстве случаев $1.0 < r_3 < 1.2$, иногда различие больше 20 %.

Заключение

По предложенной методике проведены оценки относительных значений атомного и молекулярного кислорода в спокойные дни для 4-х сезонов 2006 г. Рассмотрены также и возмущенные условия для 3-х дней апреля 2006 г. Отметим, что впервые обсуждаются изменения этих величин в дневные часы суток на высоте опорного уровня термосферы 120 км.

1. Получено, что днем в спокойных условиях $R_1=[O]/[N_2]$ меняется очень мало во все сезоны, наибольшие его величины приходится на зимний период, постепенно уменьшаясь к весне и лету и вновь увеличиваясь к осени.

Поведение отношения $[O_2]/[O]$ несколько иное: оно меняется с течением дня, обнаруживая максимальные значения в околополуденный период во все сезоны, кроме зимнего. Можно отметить, что минимальные значения R_3 в годовом ходе приходится на зимний сезон, увеличиваясь к весне и лету и вновь уменьшаясь осенью.

В сравнении с соответствующими величинами по модели термосферы в спокойный период наши оценки для R_1 несколько ниже – в пределах 10 % – во все сезоны. Различие в оценках R_3 составляет от 10 % и в отдельных случаях – в утренние и вечерние часы – до 30 % во все сезоны.

Поскольку наши расчеты были выполнены с привлечением данных по электронной концентрации, полученных для региона Иркутска в 2003–2006 гг., то довольно большие различия в отдельных случаях следует, по-видимому, отнести к необходимости коррекции Концентрации Газовых составляющих в модели термосферы в определенных условиях нашего региона.

2. Можно заключить, что в условиях умеренного геомагнитного возмущения среднедневные значения R_1 и R_3 по нашим оценкам, на высоте 120 км мало изменяются от спокойного дня к возмущенному.

3. Проведенный нами анализ межсуточных изменений отношений R_1 и R_3 , для полуденных часов на высоте 120 км для периода апреля 2006 г. показал, что в возмущенные дни отношение R_1 уменьшалось на 16–25 %, а значение R_3 на 15–35 % возрастало в сравнении с ближайшими спокойными днями, т. е. можно отметить, что в условиях умеренного возмущения полученные оценки показывают незначительное изменение, порядка 15–35 %.

К сожалению, сейчас не имеется каких-либо независимых определений таких величин, с которыми можно было бы сравнить полученные результаты, за исключением обобщения данных экспериментов в модели термосферы. Сравнение с соответствующими величинами по модели MSIS дает отличие 10–20 %, иногда выше.

Дальнейшая разработка и усовершенствование предлагаемой методики использования ионосферных измерений для определения относительных газовых составляющих позволит получать значения

этих величин для разных периодов, сезонов года в различных условиях солнечной и геомагнитной активности и предоставит возможность отслеживать состояние термосферы в текущий период.

Авторы выражают благодарность Ратовскому К.Г. за предоставленные материалы по измерениям на Иркутском цифровом ионозонде для исследования и обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щепкин Л.А. и др. Возможность оценок относительного содержания атомов и молекул кислорода по данным измерений электронной концентрации в средней ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2008. Т. 48, № 1. С. 129–133.
2. Hedin A.E. MSIS-86 Thermospheric model // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, N A5. P. 4649–4662.
3. Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Уравнение модели связи электронной концентрации с характеристиками термосферы с учетом потока ионизирующего излучения // Геомагнетизм и аэронавигация. 2004. Т. 44, № 1. С. 119–122.
4. Tobiska W.K., Eparvier F.G. EUV97: Improvements to EUV irradiance modeling in the softx-rays and EUV // Solar Phys. 1998. V. 147, N 1. P. 147–159.
5. Щепкин Л.А., Кузнецова Г.М., Кушнаренко Г.П., Ратовский К.Г. Аппроксимация данных по измерениям электронной концентрации в средней ионосфере при низкой солнечной активности // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 11. С. 66–69.
6. Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Годовые вариации электронной концентрации в области F1 ионосферы // Солнечно-земная физика. 2005. Вып. 7. С. 62–65.
7. 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 аэронавигация. 2008. Т. 48, № 1. С. 129–133.
8. Щепкин Л.А., Ратовский К.Г., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Вариации газового состава термосферы летом 2003 г. над Иркутском // Солнечно-земная физика. 2005. Вып. 7. С. 95–99.
9. Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Возмущения в области F1 в апреле 2005 г. // Солнечно-земная физика. 2009. Вып. 13. (в печати).

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск