

Вариации широтно-долготных распределений термосферных параметров во время геомагнитных бурь 17-20 апреля 2002 года

Е.Н. Доронина¹, А.А. Намгаладзе^{1,2}

¹ Политехнический факультет МГТУ, кафедра физики

² Полярный геофизический институт, г. Мурманск

Аннотация. Изучение широтно-долготных вариаций параметров термосферы Земли в зависимости от геомагнитных условий было проведено методом математического моделирования. Расчеты проводились с использованием теоретической модели атмосферы Земли UAM и эмпирической модели термосферы NRLMSISE-00. По результатам расчетов были построены карты глобального распределения термосферных параметров, таких как температура нейтрального газа, концентрации молекулярного кислорода и атомарного азота, отношение их концентраций, а также отношение отношений $n(O)/n(N_2)$ в возмущенных условиях к спокойным и скорость горизонтального термосферного ветра для моментов времени 1200 и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля 2002 года. Получено, что буревые эффекты сильнее в модели UAM, чем в модели MSIS: в возмущенных условиях в высоких широтах в среднем температура нейтрального газа на 150-250 К выше.

Abstract. Study of the latitude-longitudinal variations of the Earth's thermosphere parameters depending on geomagnetic conditions has been performed by the method of mathematical modeling. Calculations have been made with use of the theoretical model of the Earth upper atmosphere (UAM) and the empirical model of the thermosphere (NRLMSISE-00). The maps of global distribution of the calculated thermospheric parameters, such as temperature of neutral gas, concentration of molecular nitrogen and atomic oxygen, the ratio of their concentrations, and also the ratio of ratio $n(O)/n(N_2)$ in the disturbed conditions to the quiet ones and the velocity of the horizontal thermospheric wind for the moments 1200 and 2400 UT on April 16, 17 and 18 have been plotted. The results show that the geomagnetic storm effects are stronger in UAM, than in MSIS: in the disturbed conditions in average the neutral temperature is 150-200 K higher.

1. Введение

В работе методом математического моделирования проведено исследование широтно-долготных вариаций состава, температурного и ветрового режимов термосферы Земли во время геомагнитных бурь 17-20 апреля 2002 года. Исследование проводилось с помощью глобальной численной модели атмосферы UAM (Намгаладзе и др., 1988; 1990; 1998; Namgaladze et al., 1991; 1998) и эмпирической модели термосферы NRLMSISE-00 (Hedin et al., 1974; 1977a,b; Hedin, 1983; 1987; 1991; Picone et al., 2000). Для решения уравнений непрерывности и теплового баланса в теоретической модели UAM начальные условия для термосферных параметров были взяты из MSIS.

В качестве входных параметров для теоретической модели UAM задавались: по DMSP-данным значения разности потенциалов через полярную шапку (рис. 1), положение границ овала высыпаний и потоки и энергии высыпавшихся частиц. По значению разности потенциалов через полярную шапку рассчитывались соответствующие ей амплитуды продольных токов зоны 1, а для плотности токов зоны 2 принимались значения 70 % от токов зоны 1 в том же долготном секторе.

В предыдущей работе было проведено исследование временных вариаций термосферных параметров в период с 15 по 20 апреля 2002 года над установками некогерентного рассеяния на высоте 350 км (Доронина и др., 2005), и было показано, что для удовлетворительного воспроизведения ионосферных параметров во время бури вариант расчета термосферы со MSIS менее пригоден, чем самосогласованный вариант модели UAM. Сравнение результатов расчетов с эмпирической моделью термосферы MSIS и с теоретической моделью UAM, продемонстрировало, что буревые эффекты в UAM более заметны, чем в MSIS. Расчет с теоретической моделью термосферы дает более высокую температуру нейтрального газа и меньшее отношение концентраций $n(O)/n(N_2)$ во время бури, чем с эмпирической. И если сравнивать экспериментальные данные по электронной концентрации с результатами модельных расчетов, что проделано в работах (Namgaladze et al., 2003; 2004a,b,c; Намгаладзе и др., 2003), то теоретическая модель UAM дает более близкие к эксперименту значения, чем MSIS. На основании этого был сделан вывод, что бури, произошедшие в период с 17 по 20 апреля 2002 г., лучше описывает теоретическая модель UAM, чем эмпирическая модель MSIS.

В настоящей работе продолжено изучение влияния геомагнитных бурь на термосферные параметры с использованием тех же вариантов расчетов, что и в предыдущей работе (Доронина и др., 2005). Но если ранее изучались изменения, происходящие во время бури с течением времени над

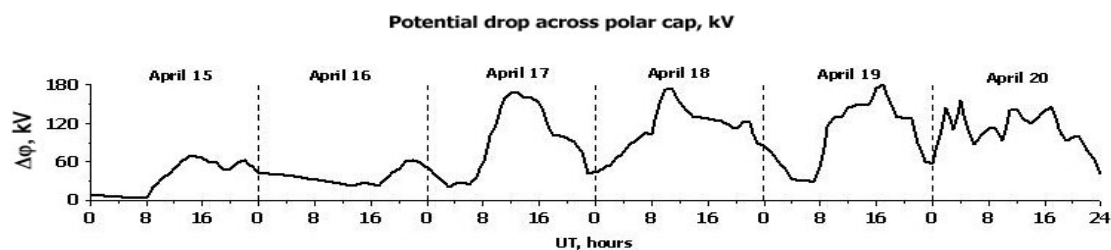


Рис. 1. Вариации разности потенциалов поперек полярной шапки в период с 15 по 20 апреля 2002 г., используемые в качестве входных параметров модели UAM

определенными точками земной поверхности, а именно, местами расположения установок некогерентного рассеяния, то в настоящей работе представлены глобальные распределения термосферных параметров, которые позволяют увидеть, какие изменения происходят в термосфере Земли в один и тот же момент времени на разных широтах и долготах.

2. Результаты расчетов

С целью изучения широтно-долготных вариаций термосферных параметров до и во время геомагнитной бури были построены глобальные распределения следующих параметров: температура нейтрального газа T_n (рис. 2), концентрация молекулярного азота $n(N_2)$ (рис. 3), концентрация атомарного кислорода $n(O)$ (рис. 4), отношение $n(O)/n(N_2)$ (рис. 5), отношение отношений концентраций O к N_2 (рис. 6), демонстрирующее, как и во сколько раз изменяется $n(O)/n(N_2)$ в возмущенные дни (17-18 апреля 2002 г.) по отношению к спокойным (16 апреля 2002 г.), и горизонтальная скорость термосферного ветра (рис.7). Распределения представлены в геомагнитных координатах для двух моментов времени 1200 UT и 2400 UT каждых суток периода с 16 по 18 апреля 2002 г. на высоте 350 км.

В течение этого периода в 1200 UT подсолнечная точка, обозначенная на картах кружком с точкой, находилась на долготе 75° , а в 2400 UT – на долготе 255° .

2.1. Температура нейтрального газа

На рис. 2 представлены широтно-долготные вариации температуры нейтрального газа в период с 16 по 18 апреля 2002 г. для двух моментов времени 1200 и 2400 UT. Левая колонка – результаты расчета со MSIS, правая – UAM.

Рассмотрим, как менялась температура нейтрального газа, и сравним между собой два варианта расчетов. Как видно из рис. 2, наибольшее различие в результатах расчетов наблюдается 16 апреля в 1200 UT. В этот момент времени в расчете со MSIS максимум температуры достигает значений ~ 1360 - 1400 К и находится в долготном интервале от 105° до 150° и в широтном от -20° до 40° . Этот максимум смещен от полуденного меридиана в ночную сторону примерно на 30 - 35° , что составляет примерно 2 часа. Градиент температуры максимален при переходе с ночной стороны на дневную.

В расчетах с теоретической моделью UAM в этот же момент времени максимальная температура совпадает по значению со MSIS, но находится в высокоширотной области в северном полушарии (60° - 85°) в долготном интервале от 10° до 165° . Градиент температуры больше при переходе от низких широт к высоким, чем с дневной стороны на ночную. Минимум температуры в варианте расчета с теоретической моделью термосферы 16 апреля в 1200 UT глубже (~ 760 К), чем в расчете с эмпирической моделью MSIS (~ 960 К).

К 2400 UT 16 апреля в варианте расчета MSIS T_n начинает увеличиваться в средних и высоких широтах на дневной стороне, достигая значения ~ 1440 К. В этот же момент времени в варианте UAM температура также увеличивается в средних и высоких широтах, достигая более высокого значения ~ 1560 К.

На рис. 2 видно, что с 1200 UT 17 апреля 2002 г., когда буря уже началась и разность потенциалов достигла ~ 170 кВ (рис. 1), и дневная и ночная температуры увеличиваются по всему глобусу в обоих вариантах расчетов. Но в варианте UAM этот рост заметнее, чем в варианте MSIS. При этом если в варианте MSIS температура нейтралов увеличивается в высоких широтах как в северном, так и в южном полушарии (хотя в северном сильнее), достигая 17 апреля в 1200 UT значений ~ 1480 К, то в варианте UAM температура заметно возрастает (до ~ 1560 К) только в северном полушарии.

Принято считать, что температура нейтрального газа начинает увеличиваться через несколько часов (~ 6 часов) после начала бури. А из результатов расчетов и с теоретической моделью UAM, и с эмпирической моделью MSIS видно, что T_n увеличивается уже к 2400 UT 16 апреля, т.е. до начала основной бури и продолжает расти к 1200 UT 17 апреля. Очевидно, это связано с увеличением разности потенциалов поперек полярной шапки в интервале 1700-2400 UT 16 апреля (рис. 1).

К 2400 UT 18 апреля картины глобального распределения температуры нейтралов становятся близки друг к другу в обоих вариантах расчетов. Как видно из рис. 2, и в варианте UAM, и варианте MSIS в северном полушарии температура выше, чем в южном полушарии и достигает максимальных значений в высокоширотных областях. Это связано с тем, что подсолнечная точка в рассматриваемый промежуток времени находится в северном полушарии, т.е. имеет место сезонный эффект. Сходство также состоит в том, что широтные градиенты температур больше, чем долготные, похожи формы изолиний, минимальные температуры близки по значению (UAM ~1040 K, MSIS ~1000 K). При этом в варианте расчета UAM максимальная температура выше (~1760 K), чем в варианте MSIS (~1520 K).

Следует обратить внимание, что собственно буревой эффект, который заключается, в том числе, и в увеличении температуры нейтрального газа по всему глобусу на фиксированной высоте, в варианте расчета UAM сильнее, чем в варианте расчета MSIS. Так, в рассматриваемый период времени в варианте UAM по всем широтам T_n увеличилась в среднем на 400-500 K, а в варианте MSIS – на 200-250 K в высоких широтах, на 100-150 K в средних и почти не изменилась в низких широтах.

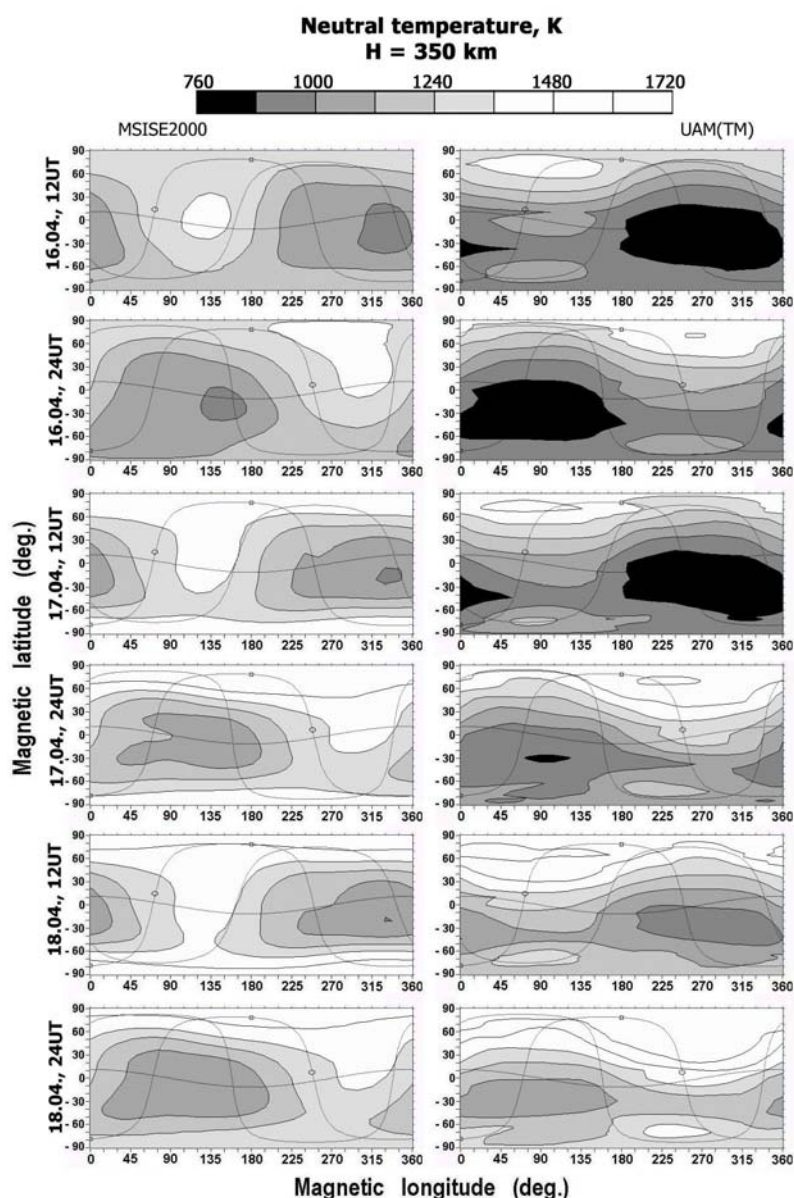


Рис. 2. Широтно-долготное распределение температуры нейтрального газа на высоте 350 км в моменты времени 1200 и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля 2002 г.

2.2. Нейтральный состав

Во время геомагнитной бури в газовом составе термосферы происходят значительные изменения, которые, в свою очередь, влияют на процессы, происходящие в ионосфере Земли. В работе (Доронина и др.,

2005) изучались временные вариации нейтрального состава в отдельных точках на высоте 350 км над поверхностью Земли, соответствующими местам расположения установок некогерентного рассеяния. Рассмотрим, какие изменения состава происходили в целом по глобусу до и вовремя бури.

2.2.1. Концентрация молекулярного азота

Широтно-долготные вариации молекулярного азота на высоте 350 км представлены на рис. 3. Они построены для моментов времени 1200 UT и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля.

Как видно из сопоставления рис. 3 и 2, карты глобального распределения концентрации молекулярного азота в обоих вариантах расчетов – и с теоретической моделью термосферы UAM, и с моделью MSIS – похожи на карты распределения температуры нейтрального газа. Это связано с тем, что молекулярный азот хорошо подчиняется барометрическому закону. В теоретической модели UAM сходство изолиний в распределениях концентрации N_2 с температурой больше, чем в MSIS, т.к. в теоретической модели UAM концентрация молекулярного азота рассчитывается строго по барометрической формуле.

Сравним между собой результаты двух вариантов расчетов – MSIS и UAM. Разница состоит в том, что, как и в случае с нейтральной температурой, в варианте UAM области с низким содержанием молекулярного азота гораздо обширнее, чем в варианте расчетов MSIS. С 16 по 17 апреля они распространяются на все южное полушарие, а в северном – на ночной стороне – вплоть до средних широт.

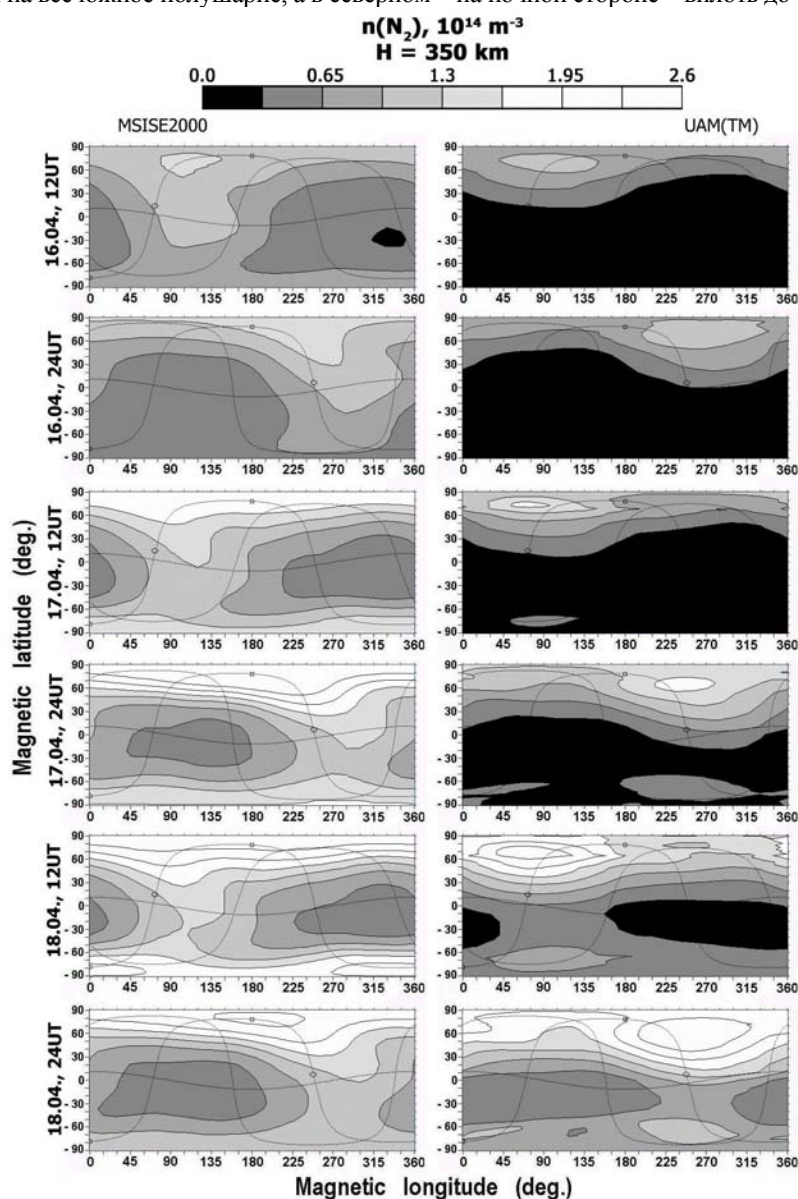


Рис. 3. Широтно-долготное распределение концентрации молекулярного азота на высоте 350 км в моменты времени 1200 и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля 2002 г.

16 апреля и в 1200 UT, и в 2400 UT содержание молекулярного азота меньше в варианте расчетов UAM, чем в варианте расчетов MSIS, что в целом соответствует более низкой температуре нейтралов в варианте UAM по сравнению с вариантом MSIS. Как и в случае с T_n , в варианте MSIS градиент концентрации больше при переходе с ночной стороны на дневную, а в варианте UAM больше широтный градиент, и направлен от низких широт к высоким. В обоих вариантах расчетов максимумы концентрации N_2 смещены от подсолнечной точки в северное полушарие, но если в варианте MSIS концентрация достигает 16 апреля в 1200 UT значения $\sim 1,4 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$, то в варианте UAM $\sim 1,1 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$.

С началом бури к 1200 UT 17 апреля $n(N_2)$ заметно возросла в варианте MSIS, достигнув в высоких широтах северного полушария значения $\sim 2 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$ во всем долготном интервале. В варианте UAM она возросла не так заметно. И хотя максимум совпадает по значению с вариантом MSIS, но он локализован в долготном интервале $50-95^\circ$ в высоких широтах северного полушария (в широтном интервале $70-80^\circ$). Минимум концентрации, как и в предыдущие сутки в варианте UAM гораздо глубже, чем в варианте MSIS.

С ростом температуры нейтрального газа во время бури растет и концентрация N_2 , но в отличие от температуры, концентрация молекулярного азота в варианте UAM растет медленнее, чем в варианте MSIS. И только к 2400 UT 18 апреля карты глобальных распределений N_2 в обоих вариантах расчетов становятся схожими. Причем в северном полушарии в варианте расчетов UAM концентрация азота даже несколько больше ($\sim 2,8 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$), чем в варианте расчетов MSIS ($\sim 2,4 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$), что имеет место и в глобальном распределении температуры нейтралов.

Как было сказано выше, молекулярный азот хорошо подчиняется барометрическому закону, поэтому характер изменений, произошедших в распределении концентрации N_2 схож с изменениями в температуре нейтрального газа. Т.е. в период с 16 по 18 апреля 2002 г. $n(N_2)$ в высоких широтах в варианте UAM увеличилась на $\sim 1,7 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$, а в варианте MSIS – на $\sim 1 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$. Таким образом, увеличение концентрации N_2 , которое наблюдается во время геомагнитной бури, в варианте UAM сильнее, чем в варианте MSIS.

2.2.2. Концентрация атомарного кислорода

На рис. 4 представлены карты глобального распределения концентрации атомарного кислорода для моментов времени 1200 и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля 2002 года на высоте 350 км. В левой колонке представлены широтно-долготные вариации, построенные по результатам расчетов с эмпирической моделью термосферы MSIS, а в правой – с теоретической моделью термосферы UAM.

Если сопоставить рис. 4 с рис. 2 и 3, то видно, что распределение $n(O)$ по форме изолиний и областям его повышенного содержания, отличается от распределений концентрации молекулярного азота и температуры нейтралов. Это связано с отклонением высотного распределения концентрации O от гидростатического в нижней термосфере, где нет диффузионного равновесия вследствие образования атомарного кислорода в реакциях фотодиссоциации O_2 и O_3 и исчезновения в реакциях столкновений с O, O_2 и O_3 (Брюнелли, Намгаладзе, 1988). Поэтому в теоретической модели UAM концентрация O рассчитывается путем решения уравнения непрерывности с учетом всех этих реакций, а также процессов переноса.

Рассмотрим, как изменялась концентрация атомарного кислорода в обоих вариантах расчетов (MSIS и UAM). Как видно из рис. 4, 16 апреля в 1200 UT и в 2400 UT области повышенного содержания атомарного кислорода в обоих вариантах расчетов расположены на дневной стороне в низких и средних широтах. В варианте MSIS концентрация O выше, чем в варианте UAM и достигает в максимуме значения $\sim 7,6 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$, тогда как в UAM максимальное значение $n(O) \sim 4,6 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$. Если в рассматриваемые моменты времени в варианте MSIS область с большим содержанием атомарного кислорода находится вблизи подсолнечной точки, то в варианте UAM таких областей две, и они расположены по обе стороны от экватора. Причем в северном полушарии эта область смещена в средние широты, а в южном – в низкие. Минимум концентрации в варианте UAM глубже ($\sim 1,4 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$), чем в варианте MSIS ($\sim 3,6 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$).

С началом бури (1200 UT 17 апреля) в варианте MSIS концентрация атомарного кислорода возрастает как на дневной, так и на ночной стороне и достигает в максимуме значения $\sim 8,4 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$. В варианте UAM увеличения концентрации нет, в максимуме значение – как и в предыдущие сутки, а вот размер области с пониженным содержанием O увеличивается, и минимум принимает значение $\sim 1,2 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$.

К 2400 UT 17 апреля в варианте MSIS $n(O)$ продолжает увеличиваться в низких и средних широтах, достигая в максимуме значения $\sim 9,6 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$, а на ночной стороне в высоких и средних широтах уменьшается, минимальное значение $\sim 2,4 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$. В варианте UAM в этот же момент времени картина широтно-долготного распределения меняется кардинально. Область повышенного содержания атомарного кислорода смещается на дневной стороне в область низких широт южного полушария ($-20-30^\circ$) в долготном интервале $270-315^\circ$ (что соответствует промежутку времени 1300-1600 MLT) и в максимуме $n(O)$ принимает значение $\sim 6 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$. Область пониженного содержания O смещается в северное полушарие, где в ночные часы она доходит до низких широт, и минимальное значение уменьшается до величины $\sim 0,8 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$.

Как видно из рис. 4, в варианте UAM 18 апреля в 1200 UT концентрация O продолжает расти по всему глобусу, в тот время как в варианте MSIS заметных изменений в $n(O)$ нет. Область с повышенным содержанием атомарного кислорода находится на дневной стороне в южном полушарии, где достигает значения $\sim 7,2 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$, а область с пониженным содержанием O находится в северном полушарии на ночной стороне (в минимуме значение $\sim 1,2 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$).

К 2400 UT 18 апреля в варианте UAM $n(O)$ продолжает увеличиваться, достигая к этому моменту времени в максимуме наибольшего значения $\sim 8 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$, а в варианте MSIS концентрация O становится ниже, чем в предыдущие сутки, и в максимуме ее значение $\sim 9,2 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$.

Как видно из карт, представленных на рис. 4, в целом за период с 16 по 18 апреля $n(O)$ выше в варианте расчета MSIS, чем в варианте расчета UAM. И хотя в рассматриваемый период наблюдается изменение концентрации атомарного кислорода в обоих вариантах, в варианте расчета UAM оно заметнее. В варианте расчета MSIS широтные градиенты концентрации O больше, чем долготные, а в варианте UAM 16 апреля в 1200 UT и 2400 UT и 17 апреля в 1200 UT больше долготный градиент $n(O)$, а 17 апреля в 2400 UT и 18 апреля в 1200 и 2400 UT – широтный. Причем в варианте UAM концентрация атомарного кислорода больше в южном полушарии, а в варианте MSIS области практически симметричны относительно экватора, что позволяет сделать вывод о том, что сезонный эффект лучше проявляется в варианте UAM, и этот сезонный эффект противоположен тому, что происходит с температурой нейтрального газа и концентрацией молекулярного азота, которые увеличиваются в северном полушарии.

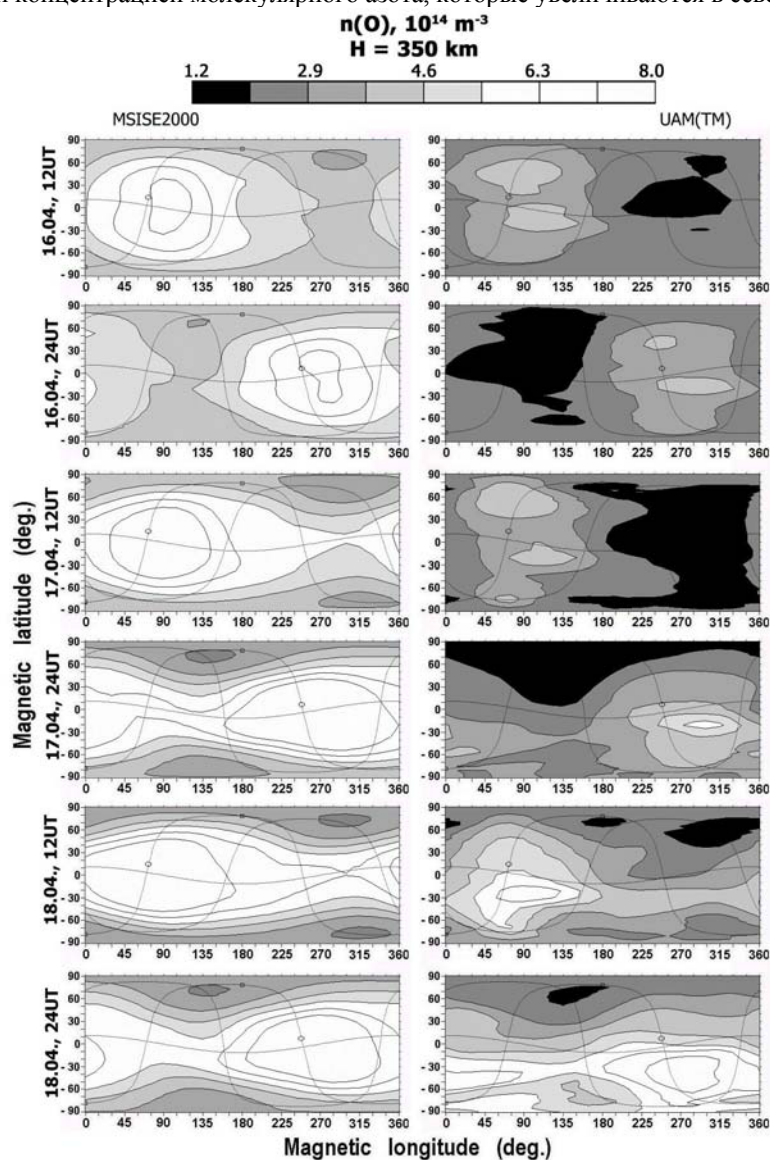


Рис. 4. Широтно-долготное распределение концентрации атомарного кислорода на высоте 350 км в моменты времени 1200 и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля 2002 г.

2.2.3. Отношение концентраций $n(O)/n(N_2)$

Известно, что во всех ионосферных слоях заряженные частицы являются малой примесью к нейтральной атмосфере, поэтому состав и динамика нейтральной атмосферы решающим образом влияют на поведение заряженных частиц. Нейтральный газ поглощает солнечное ионизирующее излучение, определяя его интенсивность на нижележащих уровнях. Нейтральная атмосфера является поставщиком ионизируемых частиц и регулятором рекомбинации заряженных частиц через промежуточный этап ионно-молекулярных реакций (Брюнелли, Намгаладзе, 1988).

Если же говорить об области F2 ионосферы – области главного максимума в высотном распределении электронной концентрации, то ионизируемой компонентой в ней является атомарный кислород, а преобладающим ионом – O^+ , т.е. концентрация электронов приблизительно равна концентрации ионов O^+ , которая в фотохимическом приближении пропорциональна отношению концентраций O к N_2 .

На рис. 5 представлены карты глобального распределения отношения концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота, построенные для моментов времени 1200 и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля на высоте 350 км. Колонка слева – вариант расчета с эмпирической моделью термосферы MSIS, колонка справа – вариант расчета с теоретической моделью атмосферы Земли UAM.

Для лучшей наглядности у шкалы верхний предел ограничен значением 20.

Как видно из рис. 5, 16 апреля в 2400 UT в северном полушарии во всем долготном интервале на широтах от 30° до 90° оба варианта расчетов: и с теоретической моделью UAM, и с эмпирической

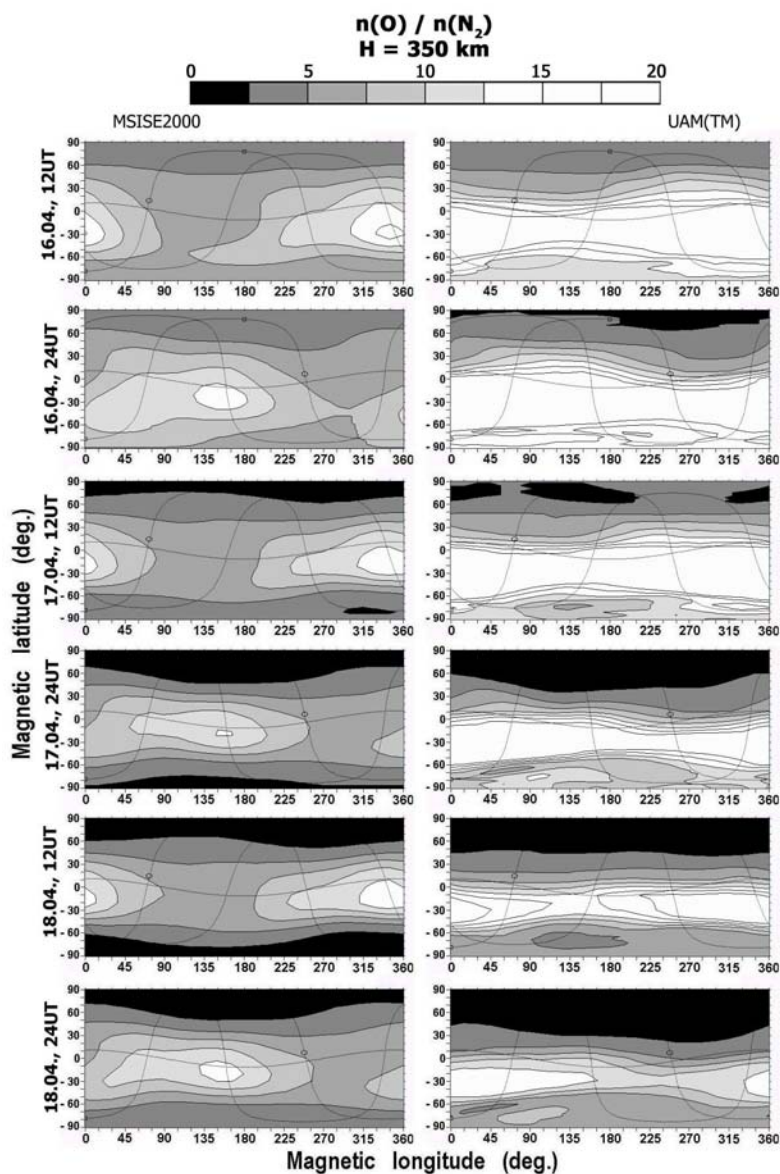


Рис. 5. Широтно-долготное распределение отношения концентраций $n(O)/n(N_2)$ на высоте 350 км в моменты времени 1200 и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля 2002 г.

моделью термосферы MSIS дают примерно одинаковые значения отношения концентраций $n(O)/n(N_2) \sim 2,5 \div 5$. А в низких широтах северного полушария и по всем широтам южного во всем долготном интервале в варианте UAM отношение концентраций O к N_2 больше, чем в варианте MSIS и в максимуме достигает значения ~ 36 , тогда как в MSIS максимум $n(O)/n(N_2) \sim 16$.

К моменту начала бури (1200 UT 17 апреля) отношение концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота уменьшается в обоих вариантах расчетов. Это связано с увеличением разности потенциалов поперек полярной шапки еще 16 апреля (рис.1), повлекшим за собой увеличение температуры нейтрального газа, что в свою очередь привело к уменьшению $n(O)/n(N_2)$.

Но если в варианте MSIS отношение O к N_2 падает по всем широтам, и его минимальное значение ~ 1 , а максимальное ~ 15 , то в варианте UAM в высоких широтах $n(O)/n(N_2)$ уменьшается и в минимуме принимает значение меньше 1, а в средних и низких широтах южного полушария растет и в максимуме достигает ~ 44 .

В последующие моменты времени (17 апреля в 2400 UT и 18 апреля в 1200 и 2400 UT), т.е. уже в ходе бури в обоих вариантах расчетов: и с теоретической моделью UAM, и с эмпирической моделью термосферы MSIS отношение концентраций O к N_2 уменьшается в целом по глобусу. Но если в высоких широтах как северного, так и южного полушарий отношение концентраций в обоих вариантах расчетов примерно одинаково, то в южном полушарии в варианте UAM отношение $n(O)/n(N_2)$ больше, чем в варианте MSIS.

И только к 2400 UT 18 апреля, как видно из рис. 5, карты глобальных распределений отношения концентраций O к N_2 в обоих вариантах расчетов становятся близки друг к другу. Максимальное и минимальное значение отношения $n(O)/n(N_2)$ в обоих вариантах расчетов совпадают, принимая значения ~ 15 и ~ 1 , соответственно. Отличие вариантов расчетов состоит в том, что в варианте UAM область с низким значением отношения опускается на дневной стороне до 30° северной широты, а в варианте MSIS – примерно до 50° . Область с высоким значением отношения концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота в обоих вариантах расчетов находится в южном полушарии, но в варианте расчета MSIS меньше по площади и находится в узком долготном интервале 135° - 180° , что соответствует промежутку 400-1000 MLT.

Во время геомагнитной бури в обоих вариантах расчетов отношение концентраций $n(O)/n(N_2)$ уменьшается по всему глобусу. Причем в варианте UAM отношение концентраций уменьшилось в период с 16 по 18 апреля 2002 г. в высоких широтах на $3 \div 4$, в средних и низких – на $7 \div 8$. В варианте MSIS по всем широтам $n(O)/n(N_2)$ уменьшилось на $1,5 \div 2,5$. Это говорит о том, что буревые эффекты в варианте расчета с теоретической моделью термосферы UAM сильнее, чем в варианте расчета с MSIS.

Таким образом, отношение концентраций $n(O)/n(N_2)$ в варианте расчета UAM в высоких и средних широтах северного полушария меньше, чем в варианте расчета MSIS, что отражается в соотношении значений электронной концентрации в этих же вариантах расчетов (Namgaladze et al., 2003; 2004a,b,c; Намгаладзе и др., 2003).

2.2.4. Отношение отношений концентраций $n(O)/n(N_2)$

На рис. 6 представлены карты глобального распределения широтно-долготных вариаций отношения отношений концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота в возмущенные дни к спокойному на высоте 350 км, т.е. вблизи максимума F2 слоя:

$$R = [n(O)/n(N_2)]_{\text{возм}} / [n(O)/n(N_2)]_{\text{спок}}$$

В качестве спокойных условий выбраны моменты времени 1200 и 2400 UT 16 апреля 2002 г. Хотя 2400 UT 16 апреля нельзя отнести к полностью спокойным условиям, т.к. в этот момент времени наблюдалось увеличение разности потенциалов поперек полярной шапки (рис. 1), был выбран этот момент, чтобы избежать влияния UT-эффекта. В левой колонке представлены результаты, полученные на основании расчетов с эмпирической моделью термосферы MSIS, в правой – с теоретической моделью атмосферы Земли UAM.

Как было сказано выше, в фотохимическом приближении электронная концентрация пропорциональна отношению концентраций $n(O)/n(N_2)$. Отношение R , которое показывает во сколько раз $n(O)/n(N_2)$ в возмущенных условиях отличается от $n(O)/n(N_2)$ в спокойных условиях, позволяет оценить, как изменяется в ходе бури соотношение между скоростями образования и потерь ионов O^+ .

Как видно из карт, представленных на рис. 6, отношение R с развитием бури уменьшается и в варианте расчетов UAM, и в варианте MSIS. Но если в варианте MSIS отношение R уменьшается в высоких и средних широтах, а в низких практически не изменяется, то в UAM R уменьшается по всему глобусу. При этом в MSIS отношение R меньше в высоких широтах южного полушария, а в UAM – в средних широтах северного.

В 2400 UT 18 апреля в варианте MSIS в высоких широтах обоих полушарий R увеличивается по сравнению с предыдущим моментом времени (1200 UT 18 апреля), а в варианте UAM отношение R продолжает уменьшаться.

Варианты расчетов MSIS и UAM отличаются друг от друга по характеру изолиний: если в варианте MSIS они плавные, то в UAM нет, что связано с осреднением данных во MSIS.

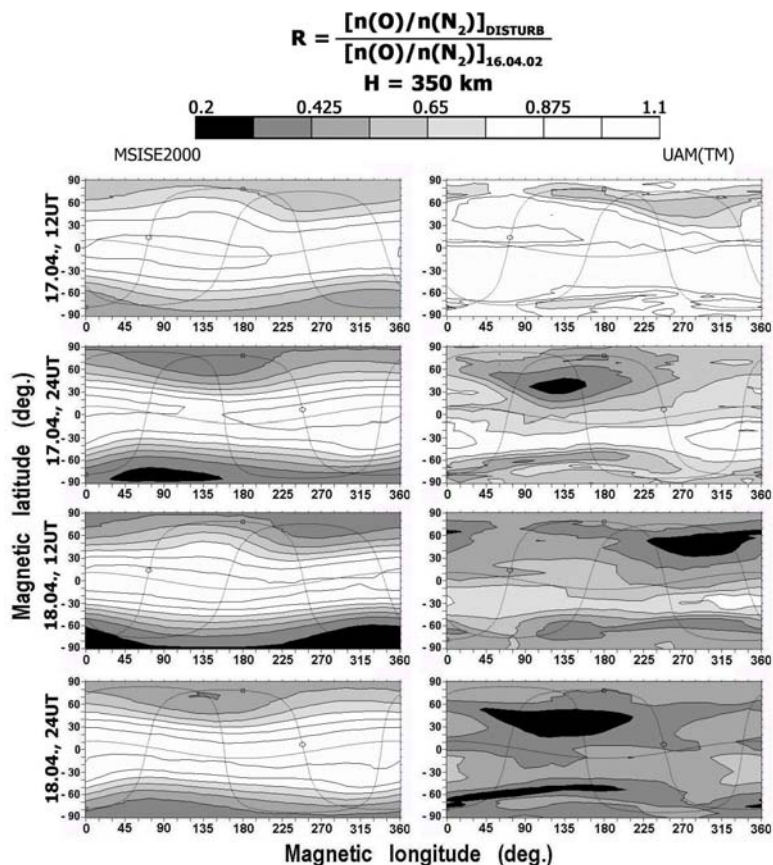


Рис. 6. Широтно-долготное распределение отношения концентраций $n(O)/n(N_2)$ в возмущенные дни к спокойному на высоте 350 км в моменты времени 1200 и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля 2002 г.

2.3. Горизонтальный термосферный ветер

Направление и сила термосферного ветра зависят от геомагнитных условий. В спокойных условиях, когда решающую роль в характере термосферных ветров играет солнечный разогрев, нейтральный газ растекается из дневного полушария в ночное от области повышенного давления. Днем ветер дует преимущественно к полюсам, а ночью – к экватору.

С усилением геомагнитной активности характер глобального распределения термосферных ветров меняется вследствие выпадений энергичных частиц и усиления токов в высоких широтах. Появляются два дополнительных источника движений нейтрального газа: тепловой, обусловленный высокоширотным разогревом термосферы за счет джоулева тепла авроральных токов и диссипации энергии выпадающих из магнитосферы частиц, и пондеромоторный, связанный с передачей импульса от быстро движущихся заряженных частиц к нейтральным. Увеличение температуры нейтрального газа, связанное с высокоширотным разогревом, приводит к изменению градиента давления, движущего нейтральный газ.

Характер изменений силы и направления термосферного ветра в зависимости от геомагнитной активности показан на рис. 7, где представлены карты глобального распределения горизонтальной составляющей скорости термосферного ветра на высоте 350 км для моментов времени 1200 и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля 2002 г. Расчеты проводились в двух вариантах: градиент давления рассчитывался по эмпирической модели термосферы MSIS (левая колонка) и полностью самосогласованно в теоретической модели атмосферы Земли UAM (правая колонка). Как видно из рис. 7 в 1200 UT 16 апреля карты глобального распределения термосферного ветра в обоих вариантах расчетов близки друг к другу, хотя в варианте UAM скорость немного выше (максимальная ~400 м/с), чем в варианте MSIS (максимальное значение ~340 м/с). Но уже в 2400 UT этих же суток в варианте UAM скорость увеличивается, достигая на ночной стороне в высоких широтах северного полушария значения ~560 м/с. Очевидно, это связано с увеличением разности потенциалов поперек полярной шапки (рис. 1). В варианте MSIS скорость ветра также увеличивается, но незначительно (максимальное значение ~380 м/с).

С началом бури в 1200 UT 17 апреля скорость ветра увеличивается в обоих вариантах расчетов, и хотя, как видно на картах глобального распределения (рис. 7) в целом в варианте UAM скорость выше, чем

в варианте MSIS, но максимальное значение скорости в варианте MSIS немного больше (~880 м/с), чем в варианте UAM, где максимальная скорость ~800 м/с. В этот момент времени в высоких широтах хорошо заметны вихри, возникающие вследствие ионного трения, которое увлекает нейтральный газ вслед за электромагнитным дрейфом ионов (ионосферно-магнитосферной конвекцией). Поэтому в высоких широтах скорость движения нейтрального газа больше, чем в низких, где ионное трение играет роль тормозящей силы для нейтральных ветров, генерируемых градиентами давления от солнечного разогрева.

В 2400 UT 17 апреля скорость термосферного ветра уменьшается по всему глобусу в обоих вариантах расчетов. Максимальное значение в варианте MSIS ~440 м/с, а в варианте UAM ~520 м/с. При этом изменяется и картина ветров по сравнению с 1200 UT, что связано с разным направлением градиентов давлений от солнечного и высокоширотного источников разогрева. Также следует обратить внимание на то, что в варианте UAM в северном полушарии скорость на ночной стороне выше, чем в южном, а в варианте MSIS эта разница не так заметна.

В 1200 UT 18 апреля скорость ветра возрастает в обоих вариантах расчетов, достигая в варианте MSIS в высоких широтах значения ~840 м/с, тогда как в варианте UAM ~760 м/с. А в 2400 UT этих же суток скорость уменьшается, достигая в максимуме в варианте MSIS значения ~480 м/с, а в варианте UAM ~560 м/с.

Таким образом, можно сделать вывод, что в варианте UAM скорость горизонтального термосферного ветра в целом выше, чем в MSIS, хотя в 1200 UT 17 и 18 апреля максимальное значение скорости больше в варианте MSIS. В обоих вариантах расчетов прослеживается UT-эффект, т.е. зависимость скорости ветра от мирового времени. Это связано с тем, что в магнитно-возмущенных условиях помимо солнечного источника разогрева появляется высокоширотный, который привязан к геомагнитному полюсу. Поэтому положение максимума джоулева разогрева относительно подсолнечной точки меняется в зависимости от UT.

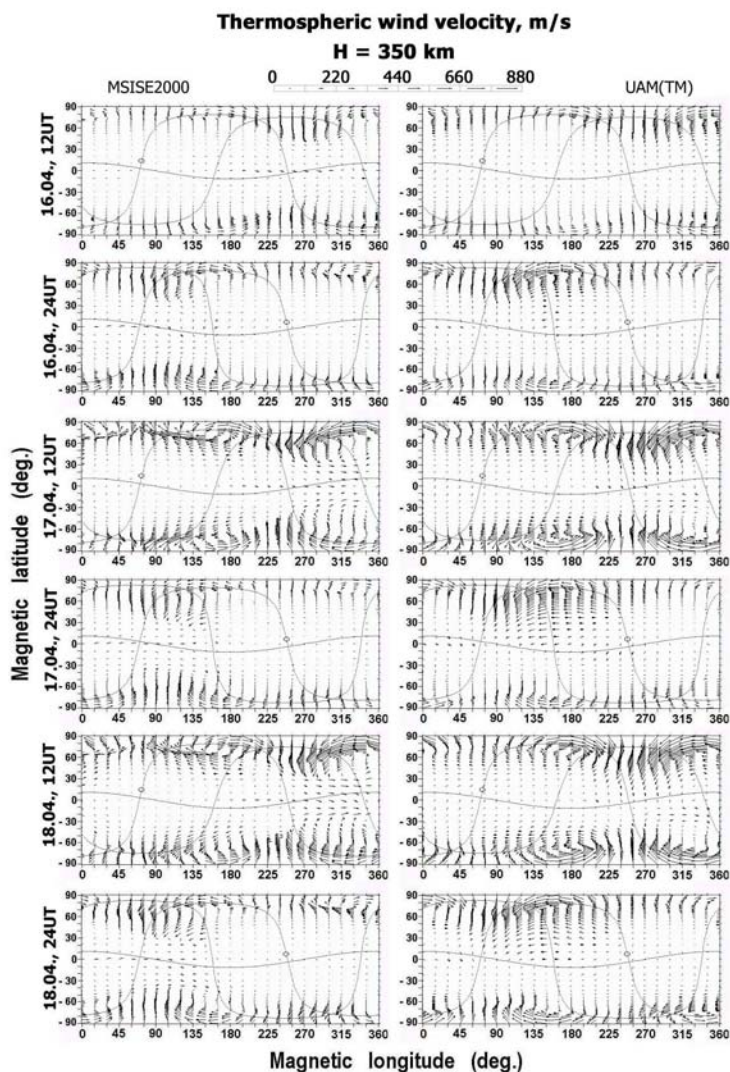


Рис. 7. Широтно-долготное распределение скорости горизонтального термосферного ветра на высоте 350 км в моменты времени 1200 и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля 2002 г.

3. Заключение

В настоящей работе методом математического моделирования было проведено исследование процессов в термосфере Земли во время апрельских геомагнитных бурь 2002 г. Проанализированы карты глобального распределения термосферных параметров на высоте 350 км для моментов времени 1200 и 2400 UT 16, 17 и 18 апреля, построенные по результатам расчетов с теоретической моделью атмосферы Земли UAM и эмпирической модели термосферы MSIS.

Расчет показал, что во время геомагнитных бурь происходит увеличение температуры нейтрального газа по всем широтам, но наибольших значений она достигает в высоких широтах. При этом в варианте UAM температура выше, чем в варианте MSIS. В обоих вариантах расчетов температура нейтрального газа выше в северном полушарии, чем в южном. Это связано с тем, что подсолнечная точка в рассматриваемый промежуток времени находится в северном полушарии.

С ростом температуры происходят изменения в газовом составе термосферы Земли. Молекулярный азот поднимается с нижних слоев, и его содержание на высоте 350 км увеличивается. Связано это с тем, что N_2 хорошо подчиняется барометрическому закону, что подтверждается сходством карт глобального распределения концентрации молекулярного азота с картами распределения температуры нейтрального газа на этой же высоте. В начале расчетов концентрация молекулярного азота выше в варианте MSIS, чем в варианте UAM, но к 2400 UT 18 апреля ее значения выравниваются и становятся примерно одинаковыми в обоих вариантах расчетов.

Распределение более легкого по сравнению с молекулярным азотом атомарного кислорода во время бури также изменяется. Его концентрация во время бури уменьшается в высоких и увеличивается в низких широтах. Карты глобального распределения концентрации атомарного кислорода отличаются от карт распределения температуры нейтрального газа и молекулярного азота для той же высоты, т.к. значительную роль в картине глобального распределения атомарного кислорода играют явления переноса и реакции фотодиссоциации. В варианте расчета UAM концентрация O выше в южном полушарии, а в варианте MSIS оба полушария практически симметричны относительно экватора, таким образом, сезонный эффект лучше заметен в варианте UAM. В целом концентрация атомарного кислорода больше в варианте MSIS, чем в варианте UAM.

В F2-слое концентрация электронов примерно равна концентрации ионов O^+ , а в фотохимическом приближении $n(O^+) \sim n(O)/n(N_2)$. Поэтому изменения, происходящие во время бури с отношением концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота, имеют большое значение для вариаций концентрации электронов. Результаты расчетов с теоретической моделью атмосферы Земли UAM и с эмпирической моделью термосферы MSIS показали, что в спокойных условиях отношение $n(O)/n(N_2)$ в высоких и средних широтах северного полушария и в варианте UAM, и в варианте MSIS примерно одинаковы, а в низких широтах северного и во всем южном полушарии оно выше в варианте UAM, чем в варианте MSIS. С усилением геомагнитной активности отношение концентраций начинает уменьшаться в обоих вариантах расчетов, но в варианте UAM в высоких и средних широтах северного полушария $n(O)/n(N_2)$ достигает более низких значений, чем в варианте MSIS, что хорошо согласуется с экспериментальными данными по электронной концентрации и с ее значениями в этих же вариантах расчетов (Namgaladze et al., 2003; 2004a,b,c; Намгаладзе и др., 2003).

Что касается ветров, то их скорость также изменяется в зависимости от геомагнитных условий. В спокойных условиях на дневной стороне скорость ветра направлена преимущественно к полюсам, а на ночной к экватору, т.к. область повышенного давления "привязана" к подсолнечной точке. В магнитно-возмущенных условиях характер глобального распределения термосферных ветров меняется, т.к. появляются дополнительные источники движения нейтрального газа в высоких широтах: градиент давления, обусловленный разогревом авроральными токами и высыпавшимися из магнитосферы энергичными частицами, и пондермоторный, связанный с передачей импульса от дрейфующих ионов нейтральному газу. Сравнение результатов расчетов по теоретической модели атмосферы UAM и эмпирической модели термосферы MSIS позволяет сделать вывод, что скорость горизонтального термосферного ветра и в спокойных и в возмущенных условиях в целом выше в варианте UAM, чем в варианте MSIS, при одинаковом общем характере циркуляции.

На основании всего выше изложенного можно сделать вывод, что все буревые эффекты в целом сильнее в варианте расчета с теоретической моделью атмосферы Земли UAM, чем в варианте расчета с эмпирической моделью термосферы MSIS. А поскольку результаты расчетов с теоретической моделью UAM лучше согласуются с экспериментальными данными по электронной концентрации, полученными с помощью установок некогерентного рассеяния на различных широтах и долготах (Namgaladze et al., 2003; 2004a,b,c; Намгаладзе и др., 2003), то можно полагать, что в случае событий 17-20 апреля 2002 г. описание термосферы в теоретической модели UAM ближе к реальности, чем в эмпирической модели термосферы MSIS.

Работа поддержана грантом РФФИ № 05-05-97511.

Литература

- Hedin A.E.** A revised thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data: MSIS-83. *J. Geophys. Res.*, v.88, N A12, p.10170-10188, 1983.
- Hedin A.E.** Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, v.96, N A2, p.1159-1172, 1991.
- Hedin A.E.** MSIS-86 thermospheric model. *J. Geophys. Res.*, v.92, N A5, p.4649-4662, 1987.
- Hedin A.E., Mayr H.G., Reber C.A., Spenser N.W., Carignan G.R.** Empirical model of global thermospheric temperature and composition based on data from the Ogo 6 quadrupole mass spectrometer. *J. Geophys. Res.*, N 79, p.215-225, 1974.
- Hedin A.E., Reber G.A., Newton G.P., Spencer N.W., Brinton H.C., Mayr H.G., Potter W.E.** A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data. MSIS 2. Composition. *J. Geophys. Res.*, v.82, N 16, p.2148-2156, 1977b.
- Hedin A.E., Salah J.E., Evans J.V., Reber C.A., Newton G.P., Spencer N.W., Kayser D.C., Alcayde D., Bauer P., Cogger L., McClure J.P.** A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data. MSIS 1. Density and temperature. *J. Geophys. Res.*, v.82, N 16, p.2139-2147, 1977a.
- Namgaladze A.A., Fadeeva Yu.V., Namgaladze A.N., Martynenko O.V., Doronina E.N., Goncharenko L.P., Salah J.E., A. Van Eyken, Howells V., Thayer J.P., Taran V.I., Shpynev B., Zhou Q.** A comparison of the Upper Atmosphere Model results with the Incoherent Scatter Radar and NRLMSISE-00 data for the April 2002 magnetic storm events. *5th International Conference "Problems of Geocosmos", Book of Abstracts, St.Petersburg State University*, p.131-132, 2004b.
- Namgaladze A.A., Fadeeva Yu.V., Namgaladze A.N., Martynenko O.V., Doronina E.N., Goncharenko L.P., Salah J.E., A. Van Eyken, Howells V., Thayer J.P., Taran V.I., Shpynev B., Zhou Q.** Modelling of the ionosphere/thermosphere behaviour during the April 2002 magnetic storms: A comparison of the UAM results with the NRLMSISE-00 and ISR data. *35th COSPAR Scientific Assembly 2004, Abstracts, C1.2-0020-04*, 2004c.
- Namgaladze A.A., Goncharenko L.P., Fadeeva Yu.V., Namgaladze A.N.** April 2002 magnetic storms: A comparison of the incoherent scatter radars data and the upper atmosphere model results. *Physics of Auroral Phenomena, XXVII Annual Apatity Seminar, Abstracts, Preprint PGI-04-05-74015*, p.15-16, 2004a.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Surotkin V.A., Naumova N.M.** Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.53, N 11/12, p.1113-1124, 1991.
- Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Namgaladze A.N.** Global model of the upper atmosphere with variable latitudinal integration step. *Geomagnetism and Aeronomy International*, v.1, N 1, p.53-58, 1998.
- Namgaladze A.A., Namgaladze A.N., Martynenko O.V., Doronina E.N., Knyazeva M.A., Zubova Yu.V.** Numerical modeling of the thermosphere, ionosphere and plasmasphere behaviour during the April 2002 magnetic storms. *Physics of Auroral Phenomena, Proceedings of the XXVI Annual Apatity Seminar, Preprint PGI*, p.74-78, 2003.
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.** NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.*, v.107 (A12), doi: 10.1029/2002JA009430, 2002.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.** Физика ионосферы. *М., Наука*, 528 с., 1988.
- Доронина Е.Н., Намгаладзе А.А., Гончаренко Л.П.** Вариации термосферных параметров над станциями некогерентного рассеяния во время геомагнитных бурь 17-19 апреля 2002 года. *Вестник МГТУ*, т.8, № 1, с.132-143, 2005.
- Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глущенко Т.А., Наумова Н.М.** Математическая модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли как единой системы. *М., НИИЯФ МГУ, Математические модели ближнего космоса, Тез. докл.*, 3 с., 1988.
- Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глущенко Т.А., Наумова Н.М.** Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли. *Геоматематизм и аэронавигация*, т.30, № 4, с.612-619, 1990.
- Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В., Волков М.А., Намгаладзе А.Н., Юрик Р.Ю.** Математическое моделирование крупномасштабных возмущений верхней атмосферы Земли. *Моделирование процессов в верхней полярной атмосфере, ПГИ КНЦ РАН, Апатиты*, с.167-249, 1998.
- Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В., Zubova Ю.В., Доронина Е.Н., Князева М.А., Намгаладзе А.Н.** Математическое моделирование эффектов геомагнитных бурь 17-20 апреля 2002 года в верхней атмосфере Земли. *Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Наука и образование-2003", часть V, МГТУ, Мурманск*, с.74, 2003.