

## Вариации термосферных параметров над станциями некогерентного рассеяния во время геомагнитных бурь 17-19 апреля 2002 года

Е.Н. Доронина<sup>1</sup>, А.А. Намгаладзе<sup>1,2</sup>, Л.П. Гончаренко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Политехнический факультет МГТУ, кафедра физики

<sup>2</sup> Полярный геофизический институт, Мурманск

<sup>3</sup> Haystack Observatory, Massachusetts Institute of Technology, Westford, USA

**Аннотация.** Исследование влияния геомагнитных бурь на поведение термосферы Земли было проведено методом математического моделирования. Термосферные параметры рассчитывались двумя способами: путем решения уравнений непрерывности, движения и теплового баланса (теоретическая модель UAM – Upper Atmosphere Model) и с использованием эмпирической модели термосферы MSISE2000. Расчеты с UAM проводились двумя способами с разными начальными условиями: в варианте UAM(TM) начальные условия были взяты из MSIS, а в варианте UAM(T5) получены путем пяти суточных прогонов модели UAM. Были проанализированы временные вариации следующих термосферных параметров: температуры нейтрального газа, концентраций молекулярного азота и атомарного кислорода, отношения  $n(O)/n(N_2)$  и меридиональной составляющей скорости термосферного ветра. Сравнение различных вариантов расчетов показало, что термосферные эффекты геомагнитных бурь больше в модели UAM, чем в эмпирической модели термосферы, обеспечивая лучшее согласие с данными некогерентного рассеяния по электронной концентрации в ионосфере.

**Abstract.** Study of the geomagnetic storm influence on the Earth's thermosphere behaviour has been performed by the mathematical modelling method. Thermospheric parameters have been calculated by two ways: by solving the continuity, momentum and heat balance equations (the theoretical model UAM) and using the empirical model of the thermosphere – MSISE2000. The calculations with the UAM have been conducted in two versions with various initial conditions: in the version UAM(TM) initial conditions have been taken from the MSIS, and in the version UAM(T5) they have been taken from the quasi-steady state UAM solution obtained by 5-day model runs. The time variations of the following thermospheric parameters have been analyzed: neutral temperature, molecular nitrogen and atomic oxygen concentrations, the ratio  $n(O)/n(N_2)$  and the meridional component of the thermospheric wind. The comparison of the various calculation versions has shown that the geomagnetic storm effects in the UAM are larger than in the empirical model of the thermosphere, giving better agreement with the incoherent scatter data on the ionospheric electron density.

### 1. Введение

В апреле 2002 года на Солнце произошли вспышки – взрывные процессы, сопровождающиеся резким увеличением потока солнечного электромагнитного излучения и вещества – солнечного ветра. Скорость солнечного ветра меняется от 300 км/с в спокойные периоды до 700 км/с и более в периоды возмущений. Приближаясь к Земле, солнечный ветер сталкивается с земным магнитным полем и обтекает его по границе, называемой магнитопаузой. Геоцентрическое расстояние магнитопаузы варьируется от  $\sim 10R_E$  на дневной стороне до  $\sim 100R_E$  на ночной стороне Земли. В область, ограниченную магнитопаузой и называемую магнитосферой, солнечный ветер проникает лишь через узкие околуполусные воронки, расположенные на дневной стороне и называемые каспами. Взаимодействие верхней атмосферы Земли с солнечным ветром происходит, в основном, через процессы, развивающиеся в хвосте магнитосферы, где энергия накапливается и впоследствии сбрасывается в атмосферу.

Активные процессы на Солнце вызывают в земной атмосфере целый ряд взаимосвязанных эффектов, называемых геомагнитными бурями. Высыпаящиеся из магнитосферы вдоль силовых линий магнитного поля энергичные электроны создают дополнительную ионизацию в высоких широтах – в авроральной зоне, повышая проводимость ионосферы в этой области и усиливая токи. Разогнанные электрическим полем заряженные частицы, сталкиваясь с нейтральными, обмениваются с ними импульсом. Таким образом, энергия токов переходит в энергию хаотического теплового движения частиц (повышение температуры – Джоулево тепло), а также в энергию направленного движения (ветер). Атмосферное давление в высокоширотных областях увеличивается. Градиент давления между нагретыми и холодными областями приводит к возникновению возмущенных термосферных ветров, дующих от высоких широт к экватору и изменяющих обычную картину глобальной атмосферной циркуляции. Помимо этого, теплый воздух поднимается над высокими широтами и по мере охлаждения

опускается в низких широтах. Тем самым глобальная термосферная циркуляция перераспределяет плотность и газовый состав термосферы, обогащая высокоширотные области тяжёлыми компонентами за счёт поступления их с низких высот (Брюнелли, Намгаладзе, 1988).

Магнитосфера и ионосфера – области атмосферы, наполненные заряженными частицами. Ионосфера расположена ниже 1000 км, где еще имеется осязаемое количество нейтральных частиц, а магнитосфера простирается выше и состоит почти исключительно из ионов  $H^+$ ,  $O^+$  и электронов. Нейтральную атмосферу Земли на высотах ~90-1000 км относят к термосфере.

Геомагнитные бури апреля 2002 г. были предсказаны заранее из наблюдений за солнечной активностью. Впервые наблюдения за ними велись практически всеми установками некогерентного рассеяния радиоволн. Благодаря этому мы располагаем обширными данными о вариациях основных ионосферных параметров: температурах электронов и ионов, концентрации электронов и скорости дрейфа. Данных о вариациях термосферных параметров значительно меньше, т.к. их прямые измерения связаны с большими трудностями. Поэтому для исследования процессов в термосфере в этот период мы использовали метод математического моделирования.

## 2. Метод исследования

В настоящей работе методом математического моделирования были исследованы термосферные эффекты геомагнитных бурь апреля 2002 года, т.е. изменения температуры нейтрального газа, его состава, а также скорости и направления термосферного ветра. Важность изучения термосферных эффектов геомагнитных бурь связана с тем, что изменения плотности и состава нейтральной атмосферы определяют торможение и время жизни искусственных спутников Земли, а также влияют на ионный состав и концентрацию электронов в ионосфере, и через это – на условия радиосвязи.

Исследования проводились с помощью модели верхней атмосферы Земли UAM, которая разработана в Калининградской обсерватории ИЗМИРАН, ныне ЗО ИЗМИРАН (Намгаладзе и др., 1988; 1990; *Namgaladze et al.*, 1991). В Полярном геофизическом институте (г. Мурманск) и Мурманском государственном техническом университете модель модифицирована – повышено пространственное разрешение в высоких широтах (*Namgaladze et al.*, 1998; *Намгаладзе и др.*, 1998). В модели путем совместного решения уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральных и заряженных частиц различных сортов, а также уравнения для потенциала электрического поля, рассчитываются такие параметры околоземной среды, как электронная концентрация, ионный состав, электронная температура, ионная температура, компоненты вектора ионной скорости, электрическое поле; плотность атмосферы, температура нейтрального газа, нейтральный состав, компоненты вектора скорости нейтрального ветра. Модель является глобальной и охватывает диапазон высот от мезосферы до геоцентрического расстояния в 15 радиусов Земли.

Таким образом, модель позволяет описать высотные, широтные, долготные, суточные, сезонные, солнечно-циклические, магнитно-возмущенные (связанные с геомагнитными бурями и суббурями) вариации моделируемых параметров, а также их реакцию на искусственные воздействия.

Частью модели UAM является теоретическая модель термосферы, в которой самосогласованно рассчитываются характеристики нейтральной атмосферы (решения уравнений для температуры, концентраций нейтральных компонент и скорости ветра). Но модель UAM позволяет также вместо решения уравнений получать значения температуры и концентраций нейтральных компонент в готовом виде из эмпирической модели MSIS, инкорпорированной в UAM в виде отдельного модуля. Обе эти возможности были использованы в описываемой работе.

Эмпирические модели серии MSIS основываются на обобщении большого числа ракетных и оптических измерений, масс-спектрометрических данных и результатов наблюдений на установках некогерентного рассеяния. Они являются последними шагами в развитии целого ряда эмпирических моделей нейтральной атмосферы Земли.

Ранние эмпирические модели (*Hedin et al.*, 1974; *Jacchia*, 1965; 1977; 1978; *Engebretson et al.*, 1977; *von Zahn et al.*, 1977; *Barlier et al.*, 1978; *Köhnlein et al.*, 1979) основывались на данных торможения спутников и немногочисленных ракетных данных, откуда извлекались значения плотности, и с помощью барометрической формулы вычисляли значения температуры. С появлением установок некогерентного рассеяния и масс-спектрометров на спутниках стало возможным создание моделей, которые лучше согласуются с новыми экспериментальными данными. Первая такая модель была создана в 1976 г. (*Hedin et al.*, 1977), и затем несколько раз была модифицирована (*Hedin et al.*, 1979; 1983; 1987; 1991; *Picone et al.*, 2000). Модель NRLMSISE-00 (в дальнейшем MSIS) является последним вариантом.

Недостатком эмпирических моделей является то, что они сглаживают возмущения в атмосфере, связанные с действием нестационарных высокоширотных источников, т.к. основаны на аппроксимации статистических данных.

Имеющиеся для апреля 2002 г. обширные экспериментальные данные по ионосферным параметрам, таким как электронная концентрация, электронная и ионная температура и скорость дрейфа позволили проверить адекватность теоретической модели UAM, т.е. сравнить экспериментальные значения с результатами модельных расчетов. Поскольку расчеты с теоретической моделью UAM показали достаточно хорошее согласие с экспериментальными данными об ионосферных параметрах (Namgaladze et al., 2003; 2004a,b,c; Намгаладзе и др., 2003), это позволяет предположить, что и термосферные параметры, такие как концентрации нейтральных газов, их температура, а также скорость термосферного ветра, для которых экспериментальных данных очень мало, близки к действительно имевшим место значениям. В силу того, что теоретическая модель UAM позволяет рассчитывать параметры термосферы как путем решения уравнений непрерывности и теплового баланса, так и получать их напрямую из модели MSIS, задачей данного исследования, помимо изучения процессов, происходящих в термосфере, является сопоставление расчетов термосферных параметров по теоретической модели UAM и по эмпирической модели MSIS и получение ответа на вопрос, какая из моделей лучше воспроизводит происходящие в верхней атмосфере процессы.

### 3. Результаты расчетов

С целью изучения изменений, произошедших в период с 15 по 20 апреля 2002 г. в составе нейтральной атмосферы, ее температурного и ветрового режима, были построены временные вариации температуры нейтрального газа (рис. 1), концентрации атомарного кислорода (рис. 2), молекулярного азота (рис. 3), отношения концентраций атомарного кислорода к молекулярному азоту (рис. 4) и меридионального ветра (рис. 5) на высоте 350 км над установками некогерентного рассеяния в Аресибо (29,4° маг. шир.; 3,1° маг. долг.), Иркутске (41,7°; 174,2°), Харькове (45,8°; 117,6°), Миллстоун Хилле (54,4°; 358,5°), Тромсе (EISCAT) (66,9°; 117,2°), Свалбард (EISCAT) (74,1°; 130,7°) и Сондрестреме (77,3°; 34,9°). Поскольку имеются экспериментальные данные для меридиональной составляющей скорости термосферного ветра над Миллстоун Хиллом, были построены временные вариации меридиональной скорости (рис. 6), позволяющие сравнить экспериментальные данные и результаты расчетов. К сожалению, для других станций экспериментальных данных нет.

В модельных расчетах температура и концентрации нейтральных компонент верхней атмосферы рассчитывались двумя способами: решением уравнений непрерывности и теплового баланса (модель UAM) и из эмпирической модели нейтральной атмосферы MSIS. Расчет с теоретической моделью UAM проводился в двух вариантах, с различными начальными условиями: в первом случае (на графиках расчет обозначен как UAM(TM)) начальные условия для теоретической были взяты из эмпирической модели, а во втором (обозначено как UAM(T5)) – для стабилизации переходных процессов пять раз просчитано 15 апреля 2002 г. (спокойные условия) с теоретической моделью с постоянным значением потенциала на границе полярной шапки. Результат этого расчета взят в качестве начальных условий для моделирования остальных суток уже с переменными входными параметрами. В качестве входных параметров использовались индексы  $F_{10.7}$ ,  $A_p$ ,  $K_p$ , по DMSP-данным задавались значения разности потенциалов через полярную шапку, положение границ овала высыпаний, потоки и энергии высыпавшихся частиц. По значению разности потенциалов через полярную шапку рассчитывались соответствующие ей амплитуды продольных токов зоны 1, долготное распределение их принималось синусоидальным с максимумами в утренне-вечернем секторах, а для плотности токов зоны 2 принимались значения 70 % от токов зоны 1 в том же долготном секторе.

#### 3.1. Температура нейтрального газа

На рис. 1 представлены графики временных вариаций температуры нейтрального газа на высоте 350 км над установками некогерентного рассеяния в Аресибо, Иркутске, Харькове, Миллстоун Хилле, Тромсе, Свалбард и Сондрестреме. Расчеты показывают, что температура термосферы в целом при переходе от спокойных условий к возмущенным возрастает в дневные часы от ~1400 до 1800 К, в ночные часы, соответственно, от ~900-1000К до ~1300 К.

В спокойные дни (15-16 апреля) результаты расчетов со MSIS и теоретической термосферой незначительно отличаются друг от друга. Причем, над *Аресибо* эмпирическая модель MSIS в дневном максимуме дает температуру выше, чем теоретическая модель в варианте расчета UAM(TM) примерно на 300 К. В *средних широтах* (Харьков, Иркутск) максимальная дневная температура лежит в пределах ~1270-1410 К и кривая MSIS находится между UAM(TM) и UAM(T5). Различие заключается и в том, что максимумы температуры сдвинуты друг от друга на 2-3 часа. Над *Миллстоун Хиллом* и *высокоширотными установками* (Тромсе, Свалбард и Сондрестрем) расчет со MSIS в ночные часы показывает более высокую температуру, чем оба расчета с UAM, а в дневные часы, наоборот, более низкую.

С усилением геомагнитной активности, начиная с 17 апреля, над всеми установками некогерентного рассеяния проявляется тенденция к росту температуры. В расчетах с теоретической термосферой максимальных значений температура достигает 18-19 апреля. В зависимости от широты дневные максимальные значения распределяются следующим образом: высокие широты (Тромсе, Свалбард, Сондрестрем) – ~1680-1730 К, средние широты (Харьков, Иркутск, Миллстоун Хилл) – ~1560-1710 К, низкие широты (Аресибо) – ~1610-1690 К. В расчетах со MSIS температура достигает максимального значения практически над всеми точками уже 17 апреля, не поднимаясь выше в последующие дни. Исключение составляет Иркутск. Максимальные дневные температуры в расчете со MSIS принимают следующие значения: *высокие широты* (Тромсе, Свалбард, Сондрестрем) – ~1520-1540 К, *средние широты* (Харьков, Иркутск, Миллстоун Хилл) – ~1400-1480 К, *низкие широты* (Аресибо) – ~1420-1430 К.

Следует обратить внимание, что в *высокоширотных областях* начиная с 18 апреля суточные колебания температуры незначительны (~90-200 К) как в расчетах со MSIS, так и в расчетах с теоретической термосферой. Это можно объяснить тем, что во время бури в высокоширотной области нагрев нейтрального газа осуществляется не только солнечным излучением, но и высыпавшимися из хвоста магнитосферы частицами, а также ионосферными токами. В низких и средних широтах в это же время суточные колебания температуры составляют в расчетах с теоретической термосферой ~250-500 К, в расчетах со MSIS – ~100-300 К.

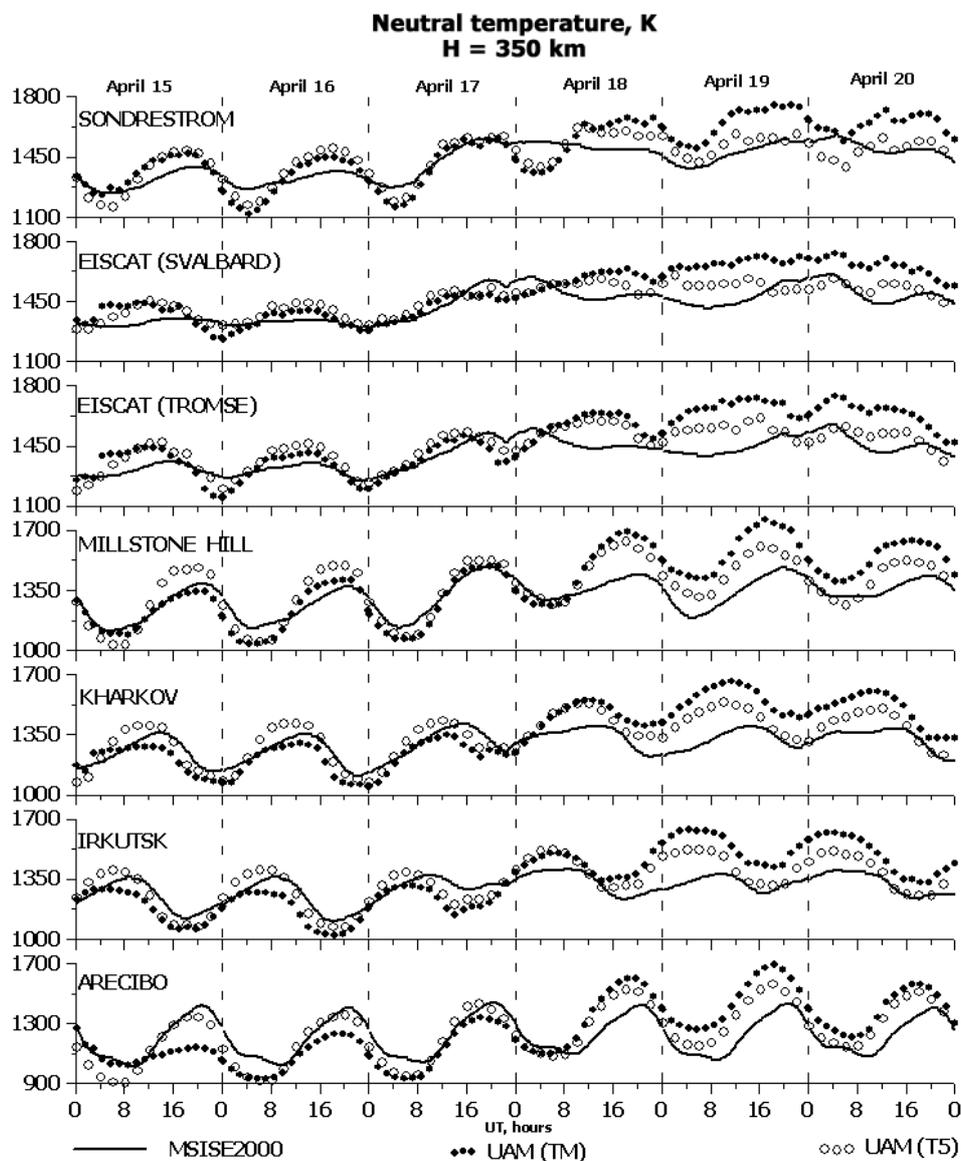


Рис. 1. Временные вариации температуры нейтрального газа на высоте 350 км

### 3.2. Нейтральный состав

Рассмотрим изменения в составе нейтральной атмосферы, которые происходили во время бури, а именно в значениях концентраций атомарного кислорода, молекулярного азота и отношения их концентраций на высоте 350 км.

#### 3.2.1. Концентрация O

На рис. 2 представлены вариации концентрации атомарного кислорода. За период времени с 15 по 20 апреля концентрация O изменялась следующим образом. В расчетах со MSIS в *высоких широтах* (Сондрестрем, Свалбард) концентрация атомарного кислорода, начиная с 17 апреля медленно уменьшается, причем в ночные часы спад более заметен, чем в дневные. Над Тромсе значение дневных максимумов практически не изменяется, но в ночные часы прослеживается падение концентрации O.

В *средних широтах* (Миллстоун Хилл, Харьков) в расчетах со MSIS значение как дневных максимумов, так и ночных минимумов в течение всего расчетного периода остается неизменным. Расчеты над Аресибо и Иркутском, начиная с 17 апреля, показывают увеличение концентрации атомарного кислорода и в дневные, и в ночные часы. Графики, построенные по результатам расчетов с теоретической моделью UAM в двух вариантах, демонстрируют отличие от состояния MSIS.

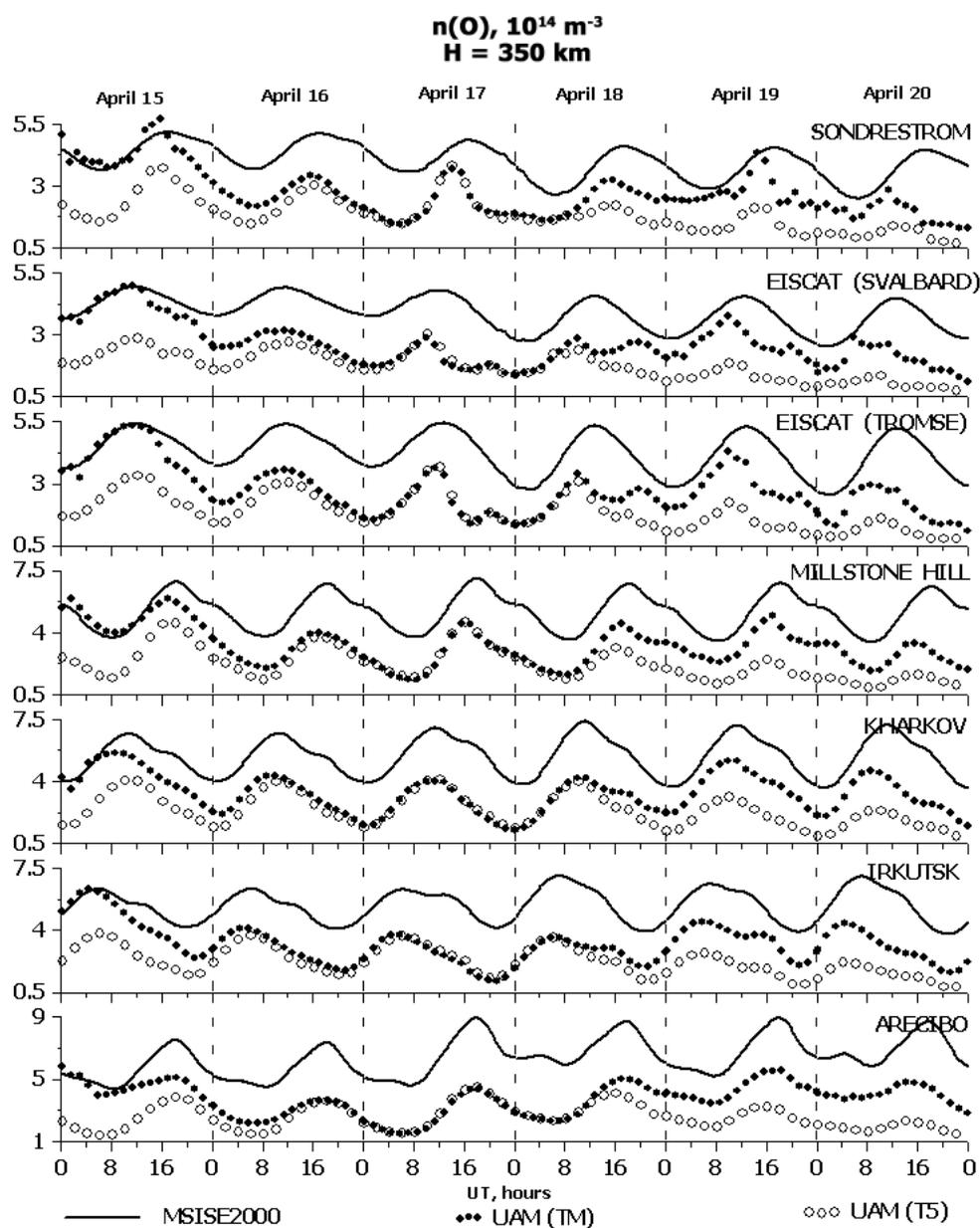


Рис. 2. Временные вариации концентрации атомарного кислорода на высоте 350 км

Как видно из графиков, в начальный момент времени (0000 UT 15 апреля) два варианта расчета с теоретической моделью термосферы значительно отличаются друг от друга (примерно в 1,5-2 раза в зависимости от станции). Концентрация O больше в варианте UAM(TM) и практически не отличается от MSIS. Это связано с тем, что начальные условия для UAM(TM) были взяты из MSIS. Но в течение суток UAM(TM) и MSIS начинают расходиться, в варианте расчета UAM(TM) концентрация O падает быстрее, и к концу 16 апреля оба варианта расчетов с теоретической моделью (UAM(TM) и UAM(T5)) дают одинаковые значения концентрации.

Сближение кривых вплоть до совпадения наблюдается в зависимости от станции до 8-12 часов 18 апреля, после чего UAM(TM) и UAM(T5) опять расходятся. Причем в расчете с UAM(TM) концентрация O начинает расти и приближаться к варианту расчетов со MSIS, а в расчете с UAM(T5) концентрация кислорода продолжает падать. Расчеты с теоретической моделью термосферы, особенно в *высоких* и *средних широтах*, демонстрируют зависимость концентрации атомарного кислорода от геомагнитной активности. Так, 17 апреля в 0200 UT, когда индексы  $K_p$  и  $A_p$  достигали значений 7 и 135, соответственно, наблюдаются локальные максимумы концентрации на графиках для Свалбарда и Тромсе.

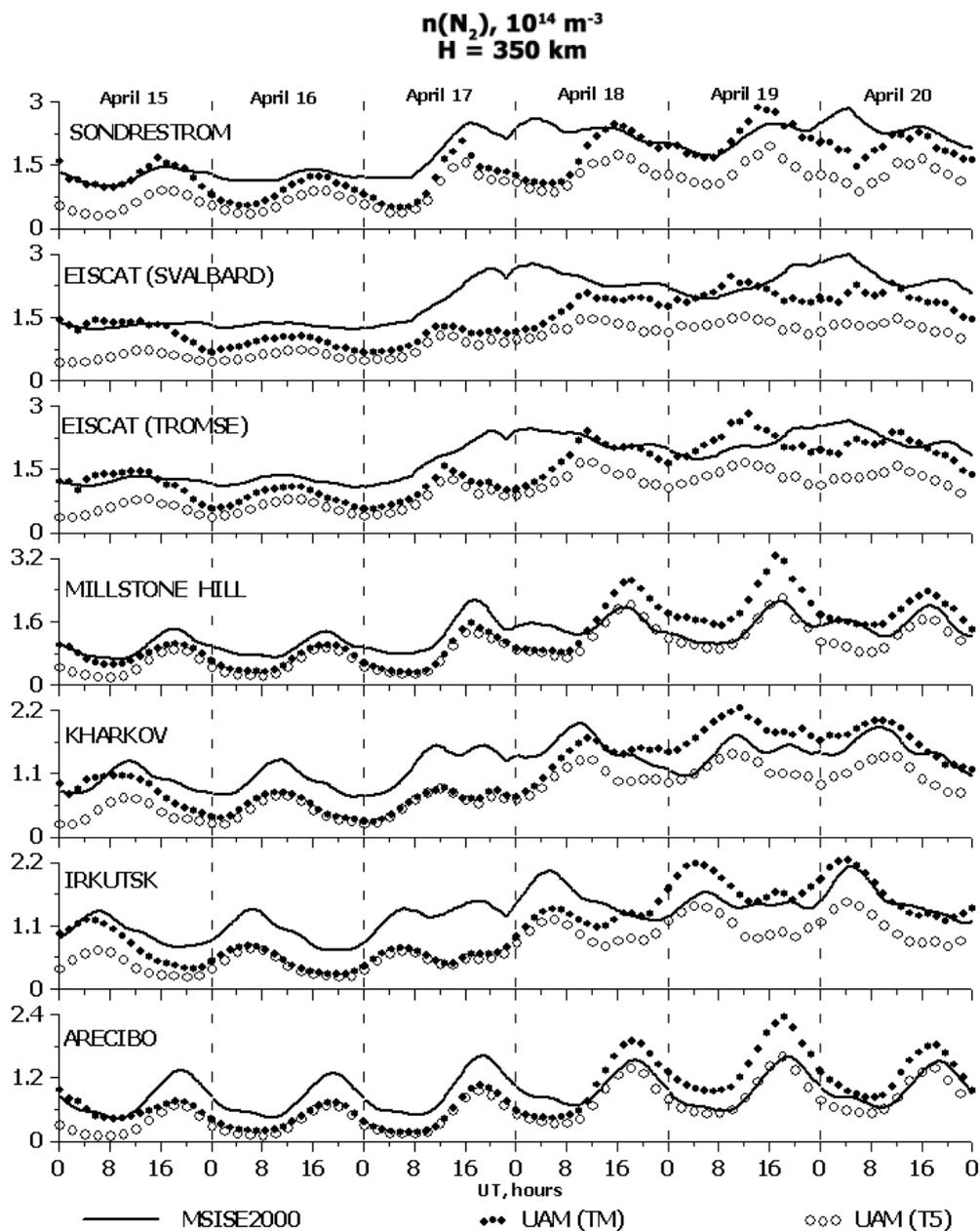


Рис. 3. Временные вариации концентрации молекулярного азота на высоте 350 км

### 3.2.2. Концентрация $N_2$

На рис. 3 представлены суточные вариации концентрации молекулярного азота. Как видно из графиков, в *высоких широтах* (Сондрестрем, Свалбард, Тромсе) в варианте расчета со MSIS 15 и 16 апреля суточная вариация концентрации азота небольшая и лежит выше, чем в обоих вариантах расчетов с теоретической термосферой.

15 апреля концентрация  $N_2$  в расчетах MSIS и UAM(TM) почти одинакова примерно до 1600 UT, а, начиная с этого момента времени, в расчете UAM(TM) ночная концентрация азота начинает уменьшаться, достигая минимального значения, а в MSIS остается практически такой же, как в дневные часы. 16 апреля в *высоких широтах* разница между вариантом MSIS и UAM(TM) наибольшая в ночные часы, а значения дневных максимумов практически совпадают.

Если сравнить между собой два варианта расчета с теоретической моделью термосферы, то в начальный момент времени (0000 UT 15 апреля) по *всем широтам* в варианте UAM(TM) концентрация  $N_2$  в 1,5-2 раза больше, чем в варианте UAM(T5). К концу суток рассчитанные в варианте UAM(TM) значения  $n(N_2)$  приближаются к UAM(T5), практически совпадая в *низких и средних широтах*.

С 17 апреля концентрация  $N_2$  начинает монотонно возрастать в целом по глобусу. В варианте расчета со MSIS концентрация молекулярного азота сначала растет быстрее, чем в обоих вариантах расчетов с UAM, но в первую половину суток 18 апреля ситуация меняется на противоположную. В *высоких широтах* кривая расчета MSIS лежит выше, чем в обоих вариантах расчетов с теоретической моделью термосферы в течение первых суток бури. И если в расчетах с теоретической моделью UAM примерно после 1200 UT 17 апреля содержание азота начинает уменьшаться (в соответствии с суточным ходом), то в варианте MSIS продолжается рост концентрации вплоть до 1800-2200 UT 17 апреля в зависимости от станции.

В ночь с 17 на 18 апреля в *высоких широтах* различие в расчетах с эмпирической моделью MSIS и теоретической моделью UAM в обоих ее вариантах максимально. Если в теоретической модели в это время имеют место ночные минимумы концентрации молекулярного азота, то в модели MSIS ночная концентрация даже больше, чем в дневные часы. Такие же ночные максимумы в модели MSIS имеют место и в ночь с 19 на 20 апреля.

Примерно в 1200 UT 18 апреля значения дневных максимумов концентрации  $N_2$  в MSIS и UAM(TM) совпадают.

В течение суток 19 и 20 апреля в *высоких широтах* значения дневных максимумов концентрации  $N_2$  в вариантах MSIS и UAM(TM) практически одинаковы.

В целом из рис. 3 видно, что в течение всего периода с 15 по 20 апреля в *высоких широтах* кривая MSIS на графиках лежит выше, чем кривые UAM(TM) и UAM(T5), за исключением дневных часов 19 апреля, т.е. эмпирическая модель MSIS дает большие значения концентрации молекулярного азота, чем оба теоретических варианта.

В *средних и низких широтах* имеет место следующее. 18 апреля в период времени с 1200 до 2000 UT в зависимости от станции вариант расчета UAM(TM) дает большую концентрацию молекулярного азота, чем расчет с MSIS и UAM(T5), а в расчете с UAM(T5) содержание  $N_2$  меньше, чем в двух других. Другими словами, кривая MSIS лежит между кривыми UAM(TM) и UAM(T5) на заключительной стадии бури.

В варианте расчетов со MSIS максимум концентрации молекулярного азота достигается 17-18 апреля и принимает следующие значения: *высокие широты* (Сондрестрем, Свалбард, Тромсе) –  $(2,4-2,7) \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$ , *средние и низкие широты* (Миллстоун Хилл, Харьков, Иркутск, Аресибо) –  $(1,5-2,1) \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$ .

В обоих вариантах расчетов с теоретической термосферой максимального значения концентрация азота достигает 18-19 апреля, принимая значения (в  $10^{14} \text{ м}^{-3}$ ): *высокие широты* – 2,0-3,0 UAM(TM), 1,75-1,94 UAM(T5); *средние широты* – 1,72-3,30 UAM(TM), 1,36-2,26 UAM(T5); *низкие широты* – 1,9-2,36 UAM(TM), 1,37-1,59 UAM(T5). Как видно из графиков, в зависимости от геомагнитных условий, к варианту расчетов со MSIS становится ближе то вариант UAM(TM), то UAM(T5).

### 3.2.3. Отношение концентраций O к $N_2$

На рис. 4 представлены временные вариации отношения концентраций O к  $N_2$ , построенные по результатам расчетов с теоретической моделью термосферы в двух вариантах UAM(TM) и UAM(T5) и с эмпирической моделью термосферы MSIS над установками некогерентного рассеяния. Согласно графикам, построенным по результатам расчетов, в *высоких широтах* кривые отношения  $n(O)/n(N_2)$  MSIS и UAM(TM) почти не отличаются друг от друга в течение первых суток (15 апреля). В спокойные дни (15-16 апреля) в этих широтах отношение изменяется незначительно, принимая значение 3,6-5,5 в зависимости от станции. В *высоких, средних и низких широтах* значения дневных максимумов в этот промежуток времени наибольшие в варианте UAM(T5), а кривая MSIS лежит между кривыми UAM(TM) и UAM(T5).

Начиная с 17 апреля, графики на рис. 4 показывают глобальное уменьшение отношения

$n(O)/n(N_2)$  во всех вариантах расчетов, причем в обоих вариантах с теоретической моделью термосферы UAM отношение концентраций O к  $N_2$  падает быстрее, чем в модели MSIS, достигая к 0000 UT 18 апреля значения 1-1,1 в *высоких широтах*, 2-2,2 – в *средних* и ~4 – в *низких широтах*.

В *высоких широтах* в варианте MSIS с 18 по 20 апреля четко прослеживается только суточная вариация отношения  $n(O)/n(N_2)$ , других изменений практически нет. В обоих вариантах расчета с теоретической моделью UAM в этот же промежуток времени  $n(O)/n(N_2)$  продолжает уменьшаться, достигая минимального за все время расчета значения ~0,5. Если сравнить между собой варианты расчетов с моделью MSIS и UAM, то, как видно из графиков, в ночные часы вариант расчета со MSIS близок к UAM, а в дневные часы отношение концентраций больше в эмпирической модели.

В *средних и низких широтах* в варианте расчета со MSIS в спокойных условиях (15-16 апреля) отношение концентраций O к  $N_2$  меньше, чем в обоих вариантах расчетов с теоретической моделью термосферы UAM. Примерно в 1200-1600 UT (в зависимости от станции) 17 апреля отношение одинаково во всех вариантах. После чего, как видно из графиков на рис. 4, в расчетах UAM примерно до 2000 UT  $n(O)/n(N_2)$  продолжает падать, а в варианте MSIS падение прекращается и даже появляется незначительный рост  $n(O)/n(N_2)$ . Как видно из графиков, кривая MSIS и в дневные, и в ночные часы с 18 по 20 апреля лежит выше, чем кривые UAM(TM) и UAM(T5).

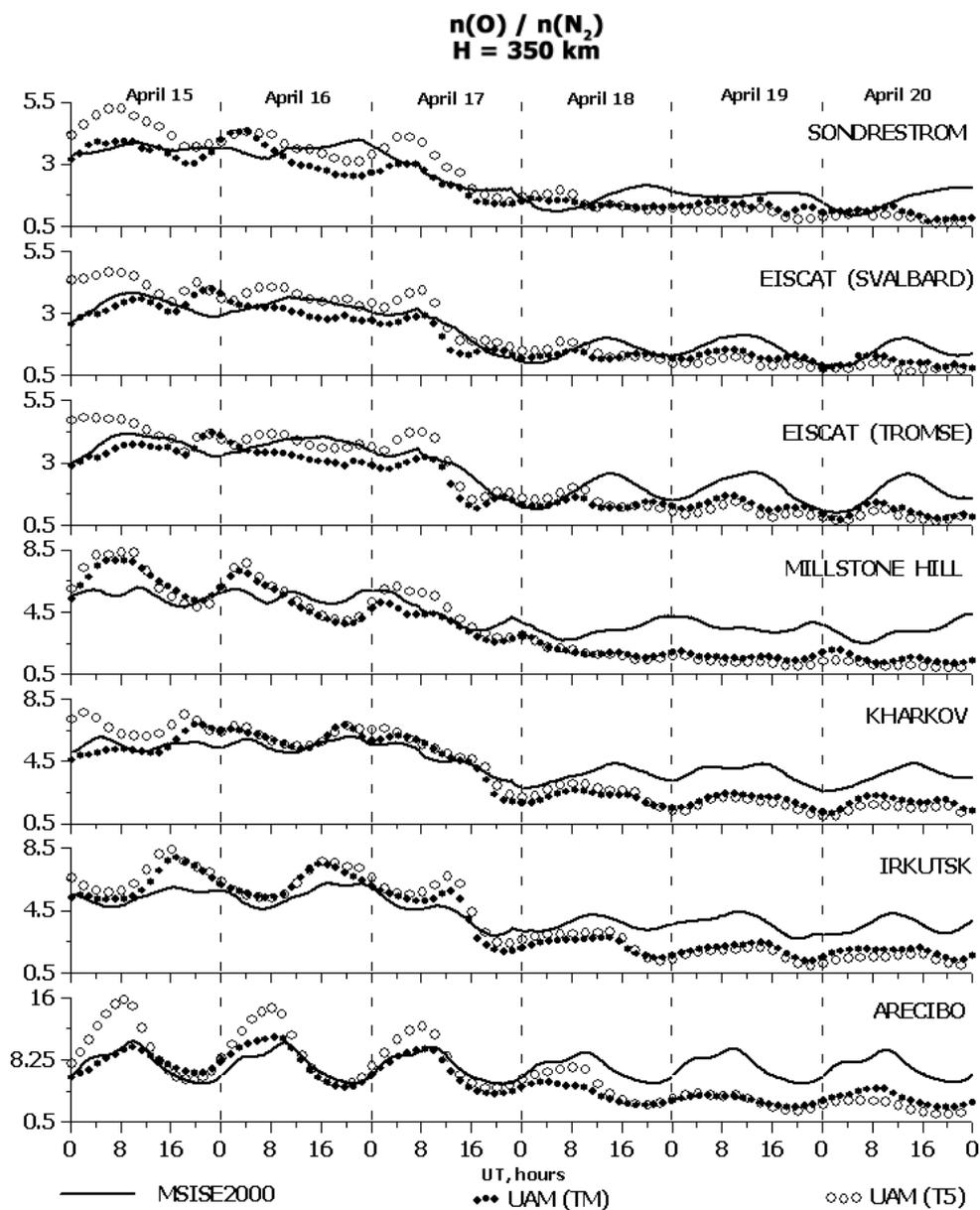


Рис. 4. Временные вариации отношения  $n(O)/n(N_2)$  на высоте 350 км

В целом за весь период расчетов буревая эффект в нейтральном составе (уменьшение  $n(O)/n(N_2)$ ) проявляется больше в теоретической модели термосферы UAM, чем в эмпирической модели MSIS.

### 3.3. Термосферный ветер

Геомагнитные условия оказывают влияние на силу и направление ветра. Ниже будут рассмотрены временные вариации меридиональной (положительное направление – к северу) составляющей скорости термосферного ветра на высоте 350 км (рис. 5 и 6), т.е. вблизи максимума F2 слоя ионосферы, где ветер слабо зависит от высоты.

На рис. 5 представлены графики результатов расчетов с эмпирической моделью термосферы MSIS и с теоретической моделью термосферы UAM (варианты UAM(TM) и UAM(T5)) для всех местоположений установок некогерентного рассеяния. Как видно из графиков, в спокойных условиях (15-16 апреля) в расчетах со MSIS и с теоретической моделью термосферы UAM в обоих её вариантах почти отсутствуют отличия друг от друга. Начиная с 1200 до 2200 UT (в зависимости от станции) 17 апреля наблюдается увеличение скорости ветра в целом по глобусу. В течение следующих трех суток (18-20 апреля) вид кривых на графиках практически не изменяется.

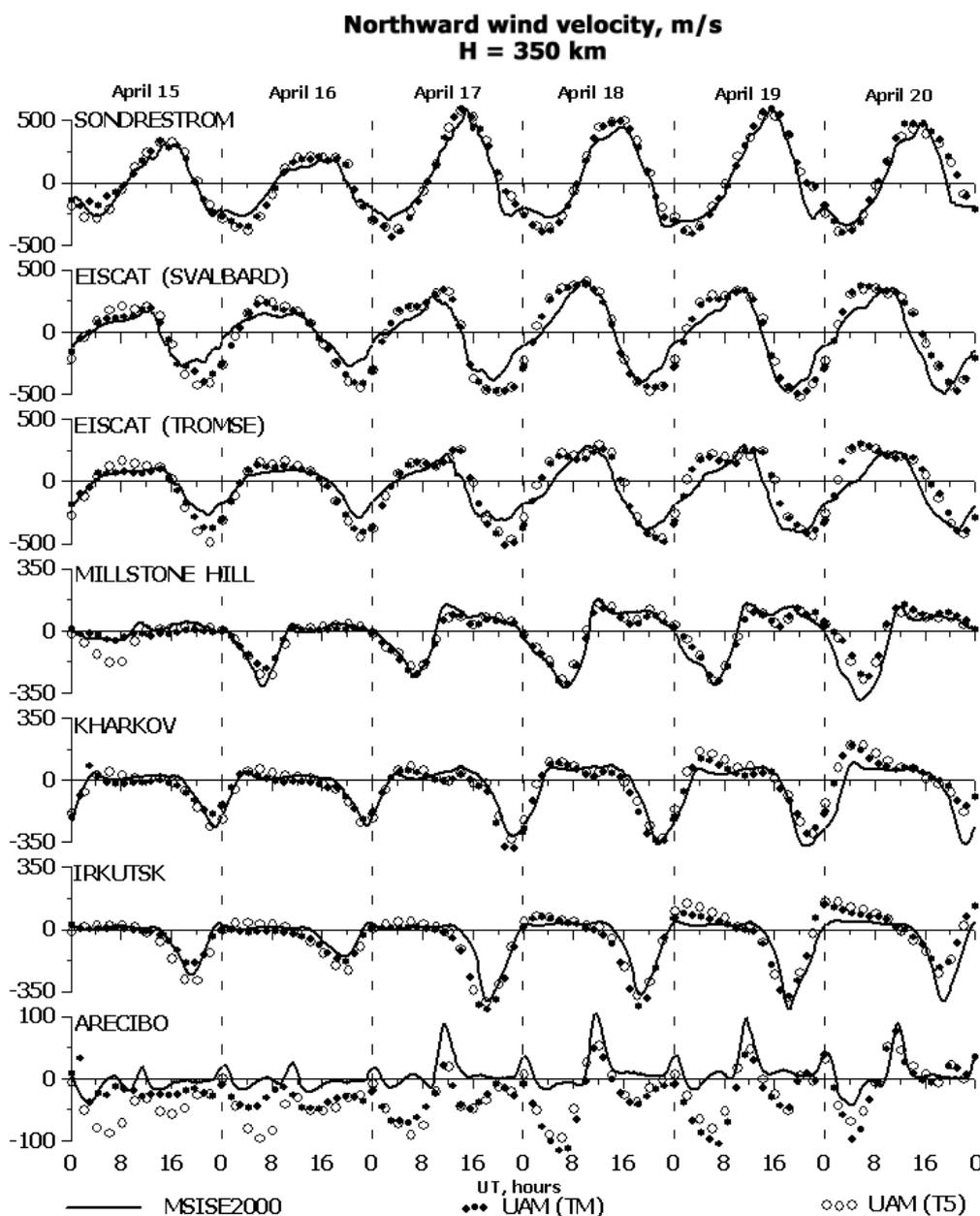


Рис. 5. Временные вариации скорости меридионального термосферного ветра на высоте 350 км

На рис. 6 сопоставлены результаты модельных расчетов и экспериментальные данные для Миллстоун Хилла. Следует учитывать тот факт, что в экспериментальных данных велика погрешность измерений, и в некоторых случаях она превосходит модуль скорости.

Как видно из графиков, 15 апреля в период с 0000 до 1200 UT кривые MSIS и UAM(TM) практически сливаются, а вариант UAM(T5) дает большую по абсолютному значению (на ~100 м/с) скорость. В промежуток времени 1600-2400 UT 15 апреля кривые графиков модельных расчетов близки к экспериментальным данным, также как и в дневное время следующих спокойных суток – 16 апреля. В ночные часы тех же суток модельные расчеты дают скорость примерно в два раза большую, чем в экспериментальных данных. Такая же картина наблюдается и в ночные часы 17 апреля до начала бури.

С усилением геомагнитной активности, начиная с 1200 UT 17 апреля, картина меняется. В экспериментальных данных появляются флуктуации, когда скорость ветра меняет не только модуль, но и направление. И если в модельных расчетах в промежутке от 0900 до 1600 UT 17 апреля ветер направлен к северу, то в экспериментальных данных преобладает южная составляющая. Начиная с 1600 UT 17 апреля, также как и в течение последующих (18-19 апреля) суток, экспериментальные значения скорости ветра близки к результатам расчетов, хотя в экспериментальных данных есть изменения скорости и направления ветра в интервалах 0600-0800 и 1200-1500 UT 18 апреля, связанные, по-видимому, с прохождением внутренних гравитационных волн.

В целом, существенные систематические различия между экспериментальными данными и результатами расчетов заключаются в больших ночных модельных значениях скорости ветра в спокойных условиях.

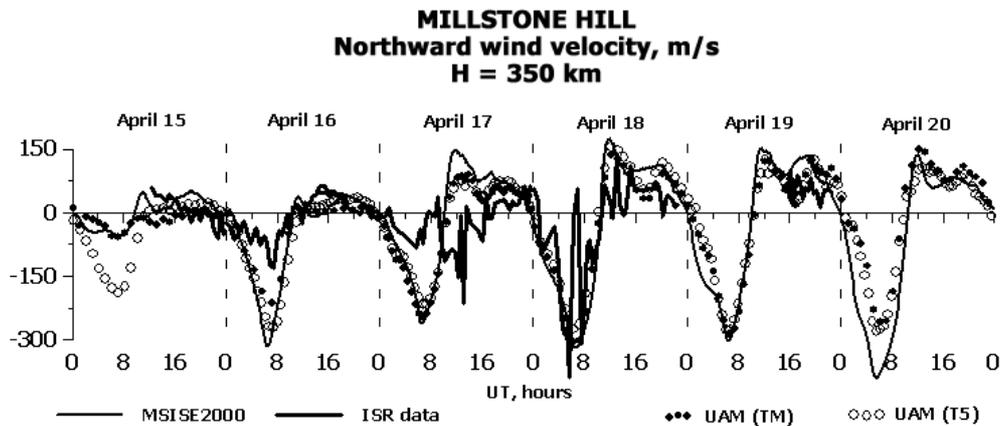


Рис. 6. Временные вариации скорости меридионального термосферного ветра на высоте 350 км над Миллстоун Хиллом. Скорость ветра положительна к северу

#### 4. Заключение

Результаты расчетов как с эмпирической моделью термосферы MSIS, так и с теоретической моделью UAM в двух вариантах (UAM(TM) и UAM(T5)) показали, что с усилением геомагнитной активности происходят изменения в составе термосферы, ее ветровом и температурном режиме. Температура нейтрального газа увеличивается по всем широтам. Причем в высоких широтах  $T_n$  достигает больших значений, чем в низких, и в них почти отсутствует суточная вариация температуры, т.к. значительный вклад в нагрев нейтрального газа в этих широтах вносят не только солнечный нагрев, но и высыпавшиеся из магнитосферы энергичные частицы, а также джоулев нагрев.

С увеличением температуры происходит изменение шкалы высот нейтрального газа. От областей разогрева газ движется вверх и по горизонтали в стороны к более холодным областям. В *высокоширотных областях* температура нейтрального газа выше, чем в средних и низких широтах, поэтому под действием градиента давления наблюдается усиление меридиональной составляющей термосферного ветра, направленной в область более низких температур. Время жизни более легкого атомарного кислорода на высотах более 100 км намного превышает сутки, поэтому его концентрация в *высоких широтах* на высоте 350 км уменьшается за счет процессов переноса. В *средних широтах* концентрация O практически не уменьшается, а *низкие широты*, наоборот, обогащаются атомарным кислородом. Концентрация более тяжелого молекулярного азота, поднимающегося с низких высот, увеличивается по всем широтам.

Таким образом, отношение концентраций O к  $N_2$  с усилением геомагнитной активности уменьшается в *высоких широтах* вследствие увеличения концентрации молекулярного азота и снижения концентрации атомарного кислорода, а в *низких* – благодаря увеличению концентрации молекулярного

азота. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению электронной концентрации во время геомагнитной бури за счет того, что в результате ионно-молекулярных реакций скорость потерь электронов превышает скорость их образования (Брюнелли, Намгаладзе, 1988).

Что касается количественных соотношений между результатами расчетов с эмпирической моделью термосферы MSIS и с теоретической моделью UAM (в вариантах UAM(TM) и UAM(T5)), то буревые эффекты в UAM более заметны, чем в MSIS. Так, 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 в обоих вариантах дает более близкие к эксперименту значения, чем MSIS. Это позволяет сделать вывод, что термосферные эффекты бурь, произошедших в период с 17 по 20 апреля 2002 года, в целом лучше описывает теоретическая модель UAM, чем эмпирическая модель MSIS.

Работа поддержана грантом РФФИ № 05-05-97511.

## Литература

- Barlier F., Berger C., Falin J.L., Kockarts G., Thuillier G. A thermospheric model based on satellite drag data. *Ann. Geophys.*, N 34, p.9-24, 1978.
- Engebretson M.J., Mauersberger K., Kayser D.C., Potter W.E., Nier A.O. Empirical model of atomic nitrogen in the upper thermosphere. *J. Geophys. Res.*, N 82, p.461-471, 1977.
- 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, 1977.
- 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, 1977.
- Jaccia L.G. Circa 1972, recent atmospheric models, and improvements in progress. *Paper presented at the 21st meeting of COSPAR, Innsbruck, Austria*, 1978.
- Jaccia L.G. Static diffusion models of the upper atmosphere with empirical temperature profiles. *SAO Spec. Rep.*, N 215, p.1-257, 1965.
- Jaccia L.G. Thermospheric temperature, density and composition: New models. *Ibid.*, N 375, p.1-106, 1977.
- Köhnlein W., Krankowsky D., Lömnerzanl P., Joos W., Volland H. A thermospheric model of the annual variations of He, N, O, N<sub>2</sub> and Ar Aeros nims data. *J. Geophys. Res.*, v.84, N A8, p.4355-4362, 1979.
- 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.
- Von Zahn U., Köhnlein W., Friske K.H., Laux U., Trinks H., Volland H.** Esro 4 model of global thermospheric composition and temperatures of low solar activity. *Geophys. Res. Lett.*, N 4, p.33-36, 1977.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.** Физика ионосферы. М., Наука, 528 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.** 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. *Геомагнетизм 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., Зубова 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.