

УДК 550.388

## ПРИЭКВАТОРИАЛЬНЫЙ ДНЕВНОЙ МИНИМУМ ПЛОТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА – МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ

© 2012 г. Е. Н. Доронина<sup>1,2</sup>, А. А. Намгаладзе<sup>1</sup><sup>1</sup>Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск<sup>2</sup>Министерство образования и науки Мурманской обл., г. Мурманск

e-mail: e.n.d@list.ru

Поступила в редакцию 24.06.2010 г.

После доработки 18.07.2011 г.

С помощью глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM проведено исследование причин формирования приэкваториальных минимумов температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне, обнаруженных в последние годы по данным спутниковых измерений. Результаты проведенных численных экспериментов позволили сделать вывод, что эти минимумы не связаны с магнитосферными источниками энергии и импульса и электрическими полями динамо-происхождения. Формирующую роль в образовании приэкваториальных минимумов температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне играют поглощенное солнечное ионизирующее излучение и вращение Земли.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В 2002 г. акселерометром на спутнике CHAMP проводились измерения плотности нейтрального газа на высотах 400–410 км. На основании полученных экспериментальных данных было установлено, что в глобальном распределении плотности на дневной стороне на широтных интервалах 20–25° по обе стороны от геомагнитного экватора существуют максимумы плотности нейтрального газа между 10 и 20 ч местного магнитного времени (MLT) [Liu et al., 2005]. Авторы отмечают, что широтное распределение плотности нейтрального газа похоже на экваториальную ионную аномалию, что, по их мнению, говорит о сильном влиянии ионосферно-термосферного взаимодействия. На рисунке 1, представлены широтные вариации плотности нейтрального газа на высоте ~400 км на меридианах, соответствующих 14 и 15 MLT, осредненные за 2002 г. для спокойных ( $Kp = 0-2$ ) условий, полученные из данных со спутника CHAMP и из результатов расчетов по эмпирической модели MSIS-90 [Hedin et al., 1991]. Из рисунка видно, что модель MSIS-90 не воспроизводит приэкваториальный минимум плотности нейтрального газа, который имеет место в экспериментальных данных.

Минимум температуры нейтрального газа на дневной стороне был также обнаружен ранее спутниками Atmosphere Explorer-E (AE-E) (1975–1981 гг.) [Spencer et al., 1981; Raghavarao et al., 1991, 1993, 1998] и Dynamic Explorer 2 (DE 2) (1981–1982 гг.) [Spencer et al., 1973; Suhasini R. et al., 2001].

До того, как данные спутника CHAMP были опубликованы, нами были проведены численные эксперименты по исследованию влияния магнитно-возмущенных условий на термосферу Земли в период магнитных бурь 17–20 апреля 2002 г. методом математического моделирования с помощью

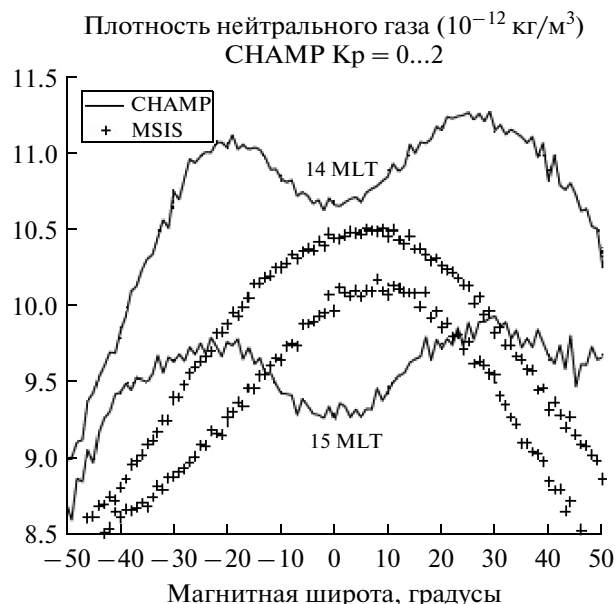


Рис. 1. Широтные вариации плотности нейтрального газа на высоте 400 км для спокойных условий на меридианах, соответствующих 14 и 15 MLT по данным спутника CHAMP и результатам расчетов по эмпирической модели MSIS-90.

глобальной математической модели UAM [Namgaladze, 1998]. Результаты расчетов показали наличие минимума концентрации атомарного кислорода на дневной стороне близи геомагнитного экватора с максимумами по обе стороны от него [Доронина и Намгаладзе, 2005], в отличие от расчетов по эмпирической модели NRMSISE-00 [Picone et al., 2002], в приэкваториальной области которые дают максимум концентрации O.

Из имеющихся результатов численных экспериментов были извлечены значения термосферной плотности на высоте 400 км. Было установлено, что теоретическая модель UAM качественно воспроизводит на дневной стороне приэкваториальный минимум плотности нейтрального газа с максимумами по обе стороны от него.

Цель работы — определить, какую роль в формировании минимумов температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне вблизи экватора играют электрические поля, выпадающие из магнитосферы энергичные частицы, ионное трение, а так же другие источники нагрева и охлаждения нейтрального газа. Для этого был проведен ряд численных экспериментов с использованием эмпирической модели термосферы Земли NRLMSISE-00 и теоретической модели верхней атмосферы Земли UAM.

## 2. МОДЕЛЬ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Исследование причин формирования приэкваториальных минимумов температуры и плотности нейтрального газа проводилось с помощью модели UAM. Модель была разработана в Калининградской обсерватории ИЗМИРАН, ныне Западное Отделение ИЗМИРАН [Намгаладзе и др., 1988, 1990; Namgaladze et al., 1988, 1991]. В Полярном Геофизическом институте (г. Мурманск) и Мурманском государственном техническом университете модель модифицирована — повышено пространственное разрешение в высоких широтах и внесены ряд других изменений [Namgaladze et al., 1998; Намгаладзе и др., 1998]. В модели термосфера, ионосфера и внутренняя магнитосфера Земли рассматриваются как единая система, в ней учитывается несовпадение геомагнитной и географической осей Земли. Модель является глобальной и охватывает диапазон высот от мезосферы (~60–90 км, положение нижней границы может меняться) до геоцентрического расстояния в 15 радиусов Земли.

В модели методом конечных разностей совместно решаются трехмерные нестационарные уравнения непрерывности (1), движения (2) и теплового баланса (3) для нейтральных и заряженных частиц различных сортов, а также уравнения для потенциала электрического поля (4).

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} + \nabla(n_\alpha \mathbf{V}_\alpha) = Q_\alpha - L_\alpha \quad (1)$$

$$\rho_\alpha \left[ \frac{d\mathbf{V}_\alpha}{dt} + \Omega \times (\Omega \times \mathbf{r}) + 2\Omega \times \mathbf{V}_\alpha \right] = \mathbf{F}_\alpha \quad (2)$$

$$\rho_\alpha c_{V\alpha} \frac{dT_\alpha}{dt} + p_\alpha \nabla \mathbf{V}_\alpha = \nabla(\lambda_\alpha \nabla T_\alpha) + P_{Q\alpha} - P_{L\alpha} \quad (3)$$

$$\nabla[\sigma_i(\nabla\phi - \mathbf{V}_\alpha \times \mathbf{B}) - \mathbf{j}_m] = 0, \quad (4)$$

где  $n_\alpha$  — концентрация частиц сорта  $\alpha$ ;  $\mathbf{V}_\alpha$  — вектор скорости частиц сорта  $\alpha$ ;  $Q_\alpha, L_\alpha$  — скорости образования и потерь частиц сорта  $\alpha$ ;  $\rho_\alpha$  — плотность частиц сорта  $\alpha$ ;  $c_{V\alpha}$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме частиц сорта  $\alpha$ ;  $T_\alpha$  — температура частиц сорта  $\alpha$ ;  $\Omega$  — вектор угловой скорости вращения Земли;  $\mathbf{F}_\alpha$  — результирующий вектор сил тяжести, градиента давления, трения;  $p_\alpha$  — давление частиц сорта  $\alpha$ ;  $\lambda_\alpha$  — коэффициент теплопроводности;  $P_{Q\alpha}, P_{L\alpha}$  — скорости нагрева и охлаждения;  $\sigma_i$  — тензор проводимости;  $\phi$  — потенциал электрического поля;  $\mathbf{B}$  — вектор магнитной индукции;  $\mathbf{j}_m$  — плотность электрического тока.

Выражения для входящих в уравнения (1)–(4) членов, а также описание начальных и граничных условий и методов решения можно найти в [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]

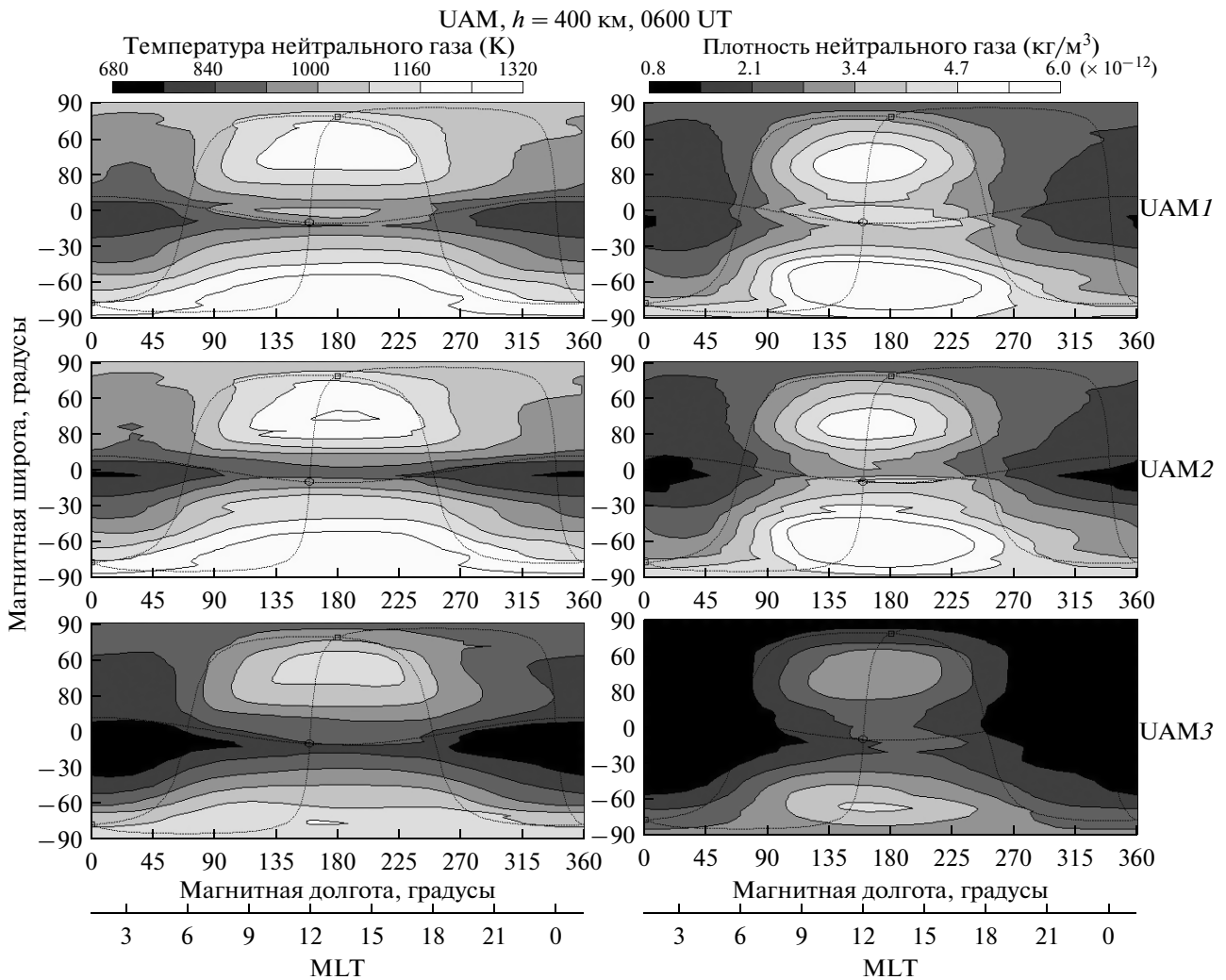
Путем решения уравнений (1)–(4) рассчитываются такие параметры околоземной среды, как электронная концентрация, ионный состав, электронная температура, ионная температура, компоненты вектора ионной скорости, электрическое поле, плотность атмосферы, температура нейтрального газа, нейтральный состав, компоненты вектора скорости нейтрального ветра. При решении используются различные системы координат и пространственные сетки с различными шагами интегрирования по координатам.

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.

## 3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

### 3.1. Влияние магнитосферных источников энергии и импульса на характер распределения температуры и плотности нейтрального газа

Чтобы исключить влияние меняющейся геомагнитной ситуации и сезонный эффект, с помощью модели UAM были проведены численные эксперименты, в ходе которых были просчитаны 10 сут с постоянными условиями, соответствующими 21 марта 2002 г. (день весеннего равноден-



**Рис. 2.** Карты глобального распределения температуры и плотности нейтрального газа на высоте 400 км для 12:00 UT 21 марта 2002 г., четвертые сутки расчетов:

UAM1 – в течение всех суток задавалась постоянная разность потенциалов поперек полярной шапки, равная 30 кВ;  
 UAM2 – отличался от первого тем, что в нем “отключено” электрическое поле в приэкваториальной области (ниже 30° в обоих полушариях);  
 UAM3 – повсеместно “отключены” электрическое поле и высыпающиеся из магнитосферы энергичные частицы.

ствия, Солнце находится точно над географическим экватором).

Для изучения влияния низко- и высокоширотных электрических полей, а также высыпающихся из магнитосферы энергичных частиц на формирование экваториальных минимумов температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне были проведены следующие расчеты.

**Вариант UAM1.** В течение всех суток задавалась постоянная разность потенциалов поперек полярной шапки, равная 30 кВ.

**Вариант UAM2.** Отличался от первого тем, что в нем было “отключено” электрическое поле в приэкваториальной области (ниже 30° в обоих полушариях).

**Вариант UAM3.** Повсеместно были “отключены” электрическое поле и высыпающиеся из магнитосферы энергичные частицы.

Результаты расчетов представлены на рис. 2. Как видно из этого рисунка, “отключение” низкоширотного электрического поля (вариант UAM2), ответственного за формирование ионосферной экваториальной аномалии, не вызвало существенных изменений в картинах распределения температуры и плотности нейтрального газа. Когда электрическое поле наряду с высыпающимися из магнитосферы энергичными частицами были “отключены” повсеместно (UAM3), температура и плотность нейтрального газа глобально уменьшились, однако экваториальные минимумы

плотности и температуры с максимумами по обе стороны от экватора сохранились.

Таким образом, приэкваториальные минимумы температуры и плотности нейтрального газа не связаны с такими источниками энергии и импульса, как электрические поля и высыпающиеся из магнитосферы энергичные частицы.

**3.2.** Влияние других механизмов нагрева и охлаждения на распределение температуры и плотности нейтрального газа в модельных расчетах.

Тепловой режим нейтральной атмосферы зависит от различных факторов. В модели UAM температура нейтрального газа рассчитывается путем решения уравнения теплового баланса (3), в котором учтены скорости нагрева и охлаждения нейтрального газа. Нагрев осуществляется солнечным диссоциирующим (ультрафиолетовым (УФ),  $\lambda \sim 400\text{--}200$  нм) и ионизирующим (крайним ультрафиолетовым (КУФ),  $\lambda \sim 200\text{--}10$  нм) излучениями, токами и дрейфами плазмы (джоулев нагрев — через ион-нейтральное трение), высыпающимися из магнитосферы энергичными частицами и теплом химических реакций. Потери тепла нейтрального газа происходят за счет инфракрасного излучения молекул  $\text{CO}_2$ , NO и атомов O.

Нагрев диссоциирующим излучением (УФ) максимален на высотах  $\sim 100$  км. На высотах выше 130–170 км преобладает нагрев нейтрального газа солнечным ионизирующим излучением (КУФ). При фотоионизации ион может оказаться в возбужденном состоянии, а почти вся избыточная энергия фотона уносится фотоэлектроном. Фотоэлектроны в кулоновских столкновениях с тепловыми электронами передают им часть энергии. Последние, в свою очередь, отдают часть своей энергии ионам, которые в процессе упругого ион-нейтрального теплообмена, преобладающего на высотах выше 300 км, нагревают нейтральный газ, и непосредственно нейтральному газу в упругих и неупругих столкновениях, возбуждая колебательные и вращательные уровни молекул и тонкую структуру атомарного кислорода. Кроме того, энергия КУФ излучения, запасенная ионами и электронами, передается нейтральному газу в виде тепла реакций диссоциативной рекомбинации.

Для исследования влияния различных механизмов нагрева (помимо уже рассмотренных выше) и охлаждения на формирование дневного экваториального минимума температуры и плотности нейтрального газа с помощью UAM был проведен ряд численных экспериментов. В ходе каждого из экспериментов просчитано по четверо суток с условиями, соответствующими 21 марта 2002 г. Поскольку минимумы температуры и плотности на дневной стороне не связаны с магнитосферными источниками энергии и импульса, в ходе дальнейших расчетов в уравнениях движения и теплового баланса для нейтрального газа не учиты-

вались члены, учитывающие термосферно-магнитосферное взаимодействие.

На рисунке 3 представлены карты глобальных распределений температуры (слева) и плотности (справа) нейтрального газа на высоте 400 км для 12:00 UT четвертых суток расчетов 21 марта 2002 г. с осями магнитная широта и MLT, построенные по результатам расчетов по модели UAM в четырех вариантах:

UAM4 — вариант расчета, где в уравнении теплового баланса для нейтрального газа учтена только скорость нагрева диссоциирующим солнечным излучением.

UAM5 — вариант расчета с учетом скоростей нагрева диссоциирующим и ионизирующим солнечным излучениями.

UAM6 — вариант расчета с учетом скоростей нагрева диссоциирующим и ионизирующим солнечным излучениями и тепла химических реакций.

UAM7 — вариант расчета с учетом скоростей нагрева диссоциирующим и ионизирующим солнечным излучениями, тепла химических реакций и Джоулева нагрева (без электрических полей).

Как видно из рис. 3, в варианте расчета UAM4 в распределениях температуры и плотности нейтрального газа практически отсутствуют суточные вариации. Наименьших значений температура и плотность достигают в приполюсных областях, наибольших — вблизи экватора на ночной стороне.

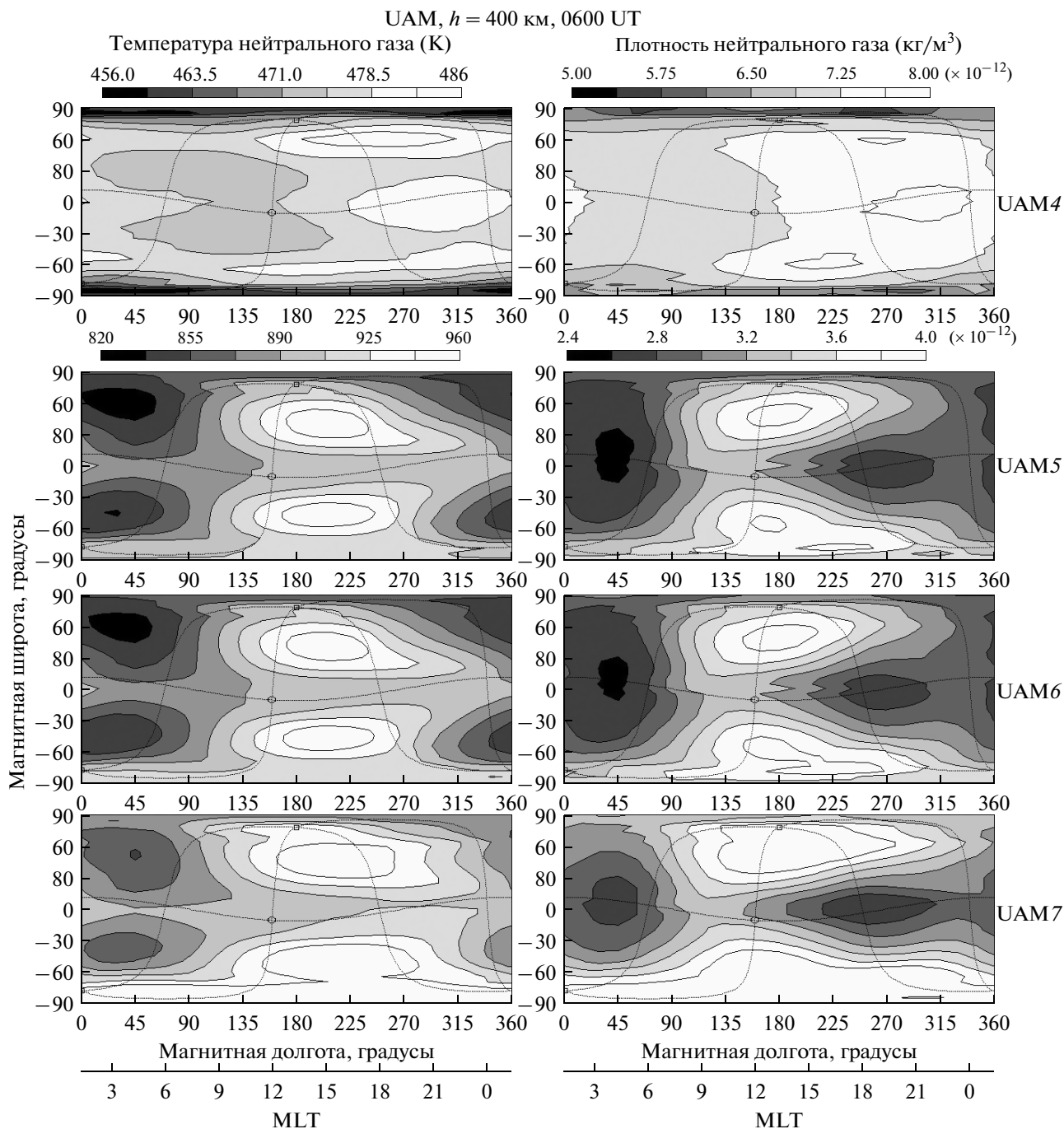
При этом разница в температуре на дневной и ночной стороне вблизи экватора порядка 10–15 К, а в плотности — порядка  $0.9 \times 10^{-14}$  кг/м<sup>3</sup>, что значительно меньше, чем разница между значениями температуры и плотности в приэкваториальной и приполюсных областях.

Поскольку диссоциирующее излучение поглощается главным образом в нижней термосфере, где процессы установления идут гораздо медленнее, чем на больших высотах, решение, полученное после четырех суток расчета, не является установившимся, что, по-видимому, не позволяет его физически интерпретировать.

С “подключением” солнечного ионизирующего излучения (вариант UAM5), характер распределения температуры и плотности существенно изменяется. Температура нейтрального газа увеличивается в среднем в два раза, а плотность — на два порядка.

Стали четко прослеживаться суточные вариации в температуре и плотности, и, что самое важное, сформировались минимумы температуры и плотности на дневной стороне вблизи экватора с максимумами на средних широтах по обе стороны от него.

Вариант расчета UAM6, где учтены скорости нагрева солнечным диссоциирующим и ионизи-



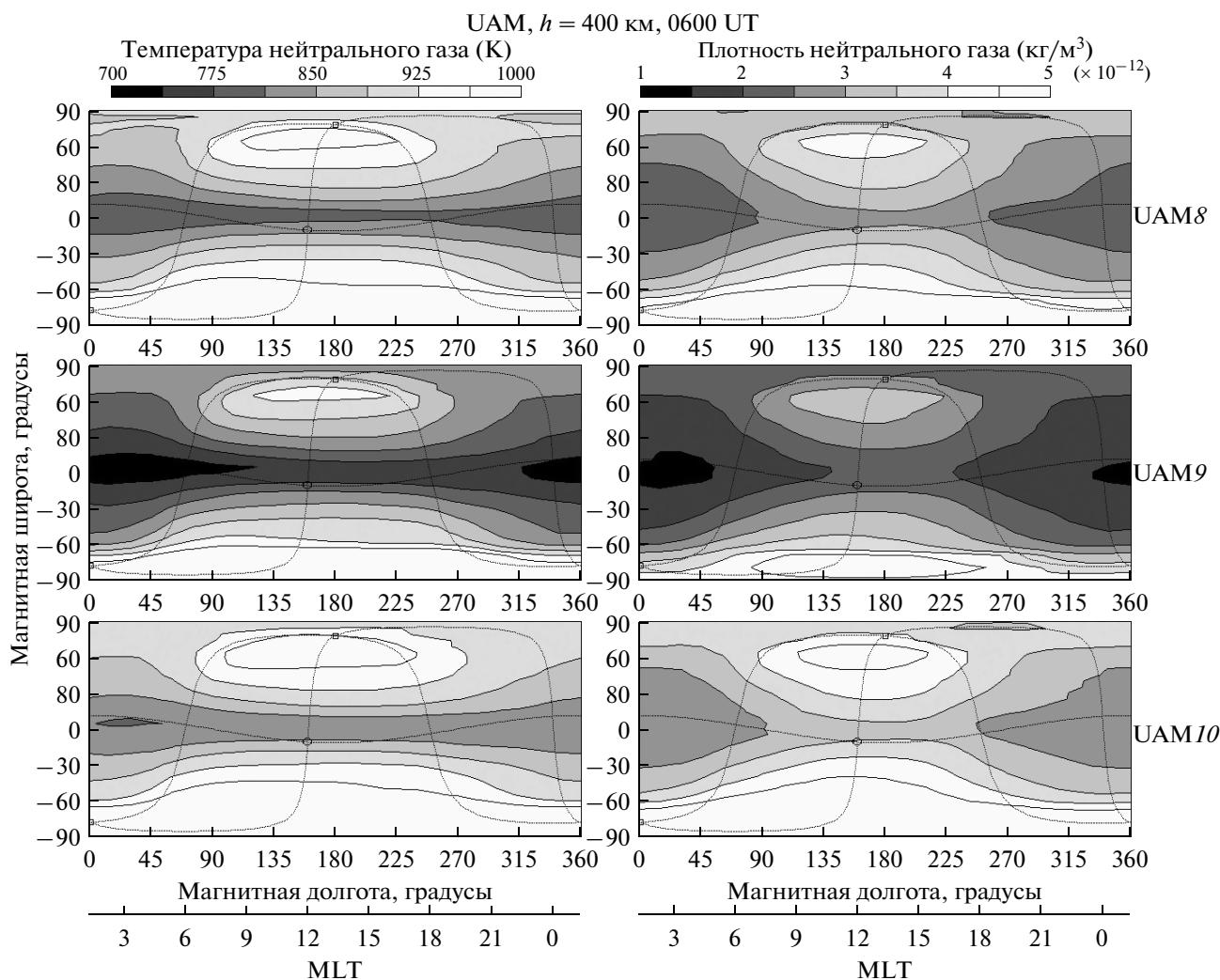
**Рис. 3.** Карты глобальных распределений температуры и плотности нейтрального газа на высоте 400 км для 12:00 UT 21 марта 2002 г., четвертые сутки расчетов, с учетом нагрева нейтрального газа:

- UAM4 – солнечным диссоциирующим излучением;
- UAM5 – солнечным диссоциирующим и ионизирующим излучениями;
- UAM6 – солнечным диссоциирующим и ионизирующим излучениями и теплом химических реакций;
- UAM7 – солнечным диссоциирующим и ионизирующим излучениями, теплом химических реакций и джоулевым нагревом.

рующим излучениями и тепло химических реакций практически не отличается от варианта UAM5 по форме изолиний. Учет тепла химических реакций в уравнении теплового баланса (3)

для нейтрального газа привел только к глобальному увеличению температуры и плотности.

Как видно из рис. 3, учет джоулева нагрева (вариант UAM7) привел не только к глобальному уве-



**Рис. 4.** Карты глобальных распределений температуры и плотности нейтрального газа на высоте 400 км для 12:00 UT 21 марта 2002 г., четвертые сутки расчетов, с учетом охлаждения нейтрального газа:

UAM8 – учтены потери тепла за счет инфракрасного излучения  $\text{CO}_2$ ;

UAM9 – учтены потери тепла за счет инфракрасного излучения O;

UAM10 – учтены потери тепла за счет инфракрасного излучения NO.

личению температуры и плотности нейтрального газа по глобусу, но и к изменению форм изолиний. Максимумы температуры и плотности сместились из средних широт в высокие, а минимумы вблизи экватора стали глубже.

Как видно из рис. 3, в варианте расчетов UAM7 в распределении температуры и плотности на дневной стороне наблюдается сходство, а на ночной стороне они отличаются друг от друга. В распределении температуры на ночной стороне вблизи экватора наблюдается максимум с двумя минимумами по обе стороны от него, а в распределении плотности на ночной стороне наблюдается минимум, смещенный от экватора в северное полушарие.

Таким образом, формирующую роль в образовании приэкваториальных минимумов температу-

ры и плотности нейтрального газа на дневной стороне играет солнечное ионизирующее излучение.

В модели UAM в уравнении теплового баланса (3) учтены скорости потерь тепла за счет инфракрасного излучения молекул  $\text{CO}_2$ , NO и атомов кислорода. С целью изучения влияния скоростей охлаждения на тепловой режим и состав нейтральной атмосферы Земли были проведены численные эксперименты, в ходе которых было просчитано четверо суток с постоянными условиями, соответствующими 21 марта 2002 г. В расчетах в уравнении теплового баланса учитывался нагрев нейтрального газа диссоциирующим и ионизирующим солнечным излучениями, теплом химических реакций и джоулев нагрев (без электрических полей). И поочередно в уравнении теплового ба-

ланса учитывались потери тепла за счет инфракрасного излучения  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}$  и  $\text{NO}$ .

По результатам расчетов были построены карты глобального распределения температуры и плотности нейтрального газа, на высоте 400 км для 12:00 UT четвертых суток расчетов 21 марта 2002 г., представленные на рис. 4 в следующих вариантах:

UAM8 – вариант расчета, в котором учтены потери тепла за счет инфракрасного излучения  $\text{CO}_2$ ;

UAM9 – вариант расчета, в котором учтены потери тепла за счет инфракрасного излучения  $\text{O}$ ;

UAM10 – вариант расчета, в котором учтены потери тепла за счет инфракрасного излучения  $\text{NO}$ .

Из карт, представленных на рис. 4 видно, что на высоте 400 км основным стоком тепла является излучение атомарного кислорода (вариант UAM9), которое приводит к уменьшению плотности нейтрального газа по глобусу на данной высоте в два раза по сравнению с результатами, полученными в варианте расчетов UAM4 (рис. 4).

Потери тепла за счет излучения  $\text{NO}$  на данной высоте практически не влияют на тепловой режим и плотность нейтрального газа (вариант UAM10, рис. 4). А учет потерь тепла за счет инфракрасного излучения  $\text{CO}_2$  (вариант UAM8, рис. 4) хотя и приводит к уменьшению температуры и плотности нейтрального газа, но на высоте 400 км вклад этого источника охлаждения менее заметен, чем сток тепла за счет  $\text{O}$ .

Как видно из карт глобального распределения температуры и плотности нейтрального газа, представленных на рис. 4, несмотря на то, что стоки тепла за счет инфракрасного излучения  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{O}$  по-разному влияют на тепловой режим и плотность нейтральной атмосферы на высоте 400 км, все три варианта расчетов (UAM8, UAM9 и UAM10) близки по формам изолиний, т.е. учет стоков тепла в уравнении теплового баланса или исключение из него не влияют на формирование минимумов температуры и плотности нейтрального газа вблизи экватора.

#### 4. ВЫВОДЫ

Методом математического моделирования было проведено исследование проблемы экваториальных минимумов температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне.

На основании проведенных численных экспериментов было установлено, что результаты расчетов по теоретической модели UAM находятся в лучшем согласии с экспериментальными данными, полученными из измерений спутника CHAMP, осредненными за 2002 г., чем результаты расчетов по эмпирической модели MSIS-90. А

именно: в распределении плотности нейтрального газа на высоте 400 км, полученном из результатов расчетов по MSIS-90, в приэкваториальной области на дневной стороне наблюдается максимум, в то время как, и в экспериментальных данных, и в результатах расчетов по UAM – минимум плотности нейтрального газа.

Экваториальные минимумы температуры и плотности нейтрального газа не связаны с дополнительными (к солнечному) источниками энергии и импульса – с электрическими полями и выпадающими из магнитосферы энергичными частицами.

Формирующую роль в образовании приэкваториальных минимумов температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне играют солнечное ионизирующее излучение (наиболее эффективно поглощаемое в термосфере на высотах выше 150–170 км), которое по цепочке фотоны–фотоэлектроны–тепловые электроны–ионы нагревает нейтральный газ, и суточное вращение Земли, генерирующие приливную структуру с упомянутым минимумом.

Остальные источники нагрева (солнечное диссоциирующее излучение, токи и дрейфы плазмы и тепло химических реакций) и охлаждения (инфракрасное излучение молекул  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$  и атомов  $\text{O}$ ) нейтрального газа влияют только на абсолютные значения температуры и плотности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы // М.: “Наука”, 167 с., 1988.
- Доронина Е.Н., Намгаладзе А.А. Вариации широтно-долготных распределений термосферных параметров во время геомагнитных бурь 17–20 апреля 2002 года // Вестн. МГТУ, Т. 8, № 1, С. 120–131, 2005. URL: [http://vestnik.mstu.edu.ru/v08\\_1\\_n19/articles/04\\_doron.pdf](http://vestnik.mstu.edu.ru/v08_1_n19/articles/04_doron.pdf)
- Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глуценко Т.А., Наумова Н.М. Математическая модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли как единой системы // Тез. конф. “Математические модели ближнего космоса”. М.: НИИЯФ МГУ. С. 3. 1988.
- Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глуценко 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. Апатиты: ПГИ КНЦ РАН. С. 167–249. 1998.

- *Hedin A.E., Biondi M.A., Burnside R.G. et al.* Revised global model of thermospheric winds using satellite and ground-based observations // *J. Geophys. Res.*, V. 96. № A5. P. 7657–07688. 1991.
- *Liu H., Lühr H., Henize V., Köhler W.* Global distribution of the thermospheric total mass density derived from CHAMP // *J. Geophys. Res.*, V. 110. A04301. doi: 10.1029/2004JA010741. 2005.
- *Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Namgaladze A.N.* Global model of the upper atmosphere with variable latitudinal integration step // *Int. J. Geomagn. Aeron.* V. 1. № 1. P. 53–58. 1998.
- *Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M.* Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *Pure Appl. Geophys.* V. 127. № 2/3. P. 219–254. 1988.
- *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 // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 53. № 11–12. P. 1113–1124. doi: 10.1016/0021-9169(91)90060-K. 1991.
- *Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.* NRLM-SISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* 107 (A12), doi: 10.1029/2002JA009430. 2002.
- *Raghavarao R., Wharton L.E., Spencer N.W., Mayr H.G., Brace L.H.* An equatorial temperature and wind anomaly (ETWA) // *Geophys. Res. Lett.*, V. 18. № 7. P. 1193–1196. 1991.
- *Raghavarao R., Hoegy W.R., Spencer N.W., Wharton L.* Neutral temperature anomaly in the equatorial thermosphere – A source of vertical winds // *Geophys. Res. Lett.*, V. 20. № 11. P. 1023–1026. doi: 10.1029/93GL01253. 1993.
- *Raghavarao R., Suhasini R., Hoegy W.R., Mayr H.G., Wharton L.* Local time variation of equatorial temperature and zonal wind anomaly (ETWA) // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 60. P. 631–642. 1998.
- *Spencer N.W., Niemann H.B., Carignan G.R.* The neutral atmosphere temperature experiment // *Radio Sci.* V. 8. P. 284–296. 1973.
- *Spencer N.W., Wharton L.E., Niemann H.B., Hedin A.E., Carignan G.R., Maurer J.C.* The Dynamics Explorer wind and temperature spectrometer // *Space Sci. Instrum.* V. 5. P. 417–428. 1981.
- *Suhasini R., Raghavarao R., Mayr H.G., Hoegy W.R., Wharton L.E.* Equatorial temperature anomaly during solar minimum // *J. Geophys. Res.* V. 106. № A11. P. 24777–24783. 2001.