

УДК 551.510.413.7:519.8

Особенности диффузионного формирования пространственной структуры плазмосферы: полностью симметричная постановка задачи

О.В. Мартыненко, М.Г. Ботова

Политехнический факультет МГТУ, кафедра физики

Аннотация. Методом численного моделирования воспроизведено формирование плазмосферы под действием исключительно процессов ионизации/рекомбинации, зарядообмена и продольной диффузии ионов O^+ и H^+ в полностью симметричной относительно экватора постановке задачи: при совпадении магнитной и географической осей и для момента равноденствия. В результате получена достаточно близкая к реальности картина распределения плотности и состава плазмы с рядом структурных особенностей: тремя ночными ионосферными максимумами электронной концентрации в приавторальных, средних и приэкваториальных широтах, областями повышенной концентрации ионов O^+ во внешней части плазмосферы и среднеширотными плазмосферными максимумами повышенной концентрации ионов H^+ . Объяснены физические механизмы образования этих особенностей, дополняющие ранее известные механизмы. Показано, что, наряду с геометрией магнитного поля, определяющий вклад в формирование этих особенностей дает пространственная неоднородность ионной температуры.

Abstract. The formation of the plasmasphere has been simulated by the numerical simulation method under the influence only of ionization/recombination, charge exchange reactions and field-aligned diffusion of ions O^+ and H^+ in a completely symmetrical 3D statement of the problem: coincided of magnetic and geographic axes for the moment of the equinox. As a result, we have got realistic enough 3D distribution of the plasma density and composition with a number of large-scale structural features: 3 night-time ionosphere electron density maxima – sub-auroral, mid-latitude and near-equatorial, and the corresponding peaks of ion O^+ density in the outer plasmasphere and ion H^+ density in the mid-latitude plasmasphere. The physical mechanisms of these features formation have been explained. It has been shown that together with geometry of the magnetic field determinative contribution to the formation of these features gives the spatial heterogeneity of T_i .

Ключевые слова: ионосфера, плазмосфера, амбиполярная диффузия, геометрия магнитного поля, наполнение и опустошение плазмосферы

Keywords: ionosphere, plasmasphere, field-aligned ion diffusion, the geometry of the magnetic field, filling and emptying of the plasmasphere

1. Введение

Плазмосфера – расположенная над ионосферой область околоземного пространства, в которой наблюдается заметная концентрация плазмы ионосферного происхождения с энергией $<1-2$ эВ. Основными ионами в плазмосфере являются ионы водорода, образующиеся в реакции зарядообмена $H+O^+ \leftrightarrow H^++O$. Присутствует также небольшое количество He^+ (10-20 %) и O^+ (5-10 %). Плазмосфера была обнаружена в начале 1960-х годов по спутниковым и радиоизмерениям (Грингауз и др., 1961; Carpenter, 1963; 1966). Снаружи плазмосфера ограничена силовыми линиями геомагнитного поля с $L \sim 2.5-7$ (в зависимости от геофизических условий; здесь L – параметр Мак-Илвейна), а ее нижняя граница расположена на высоте ~ 1000 км. Таким образом, форма плазмосферы близка к тороиду, "надетому" на Землю в экваториальной плоскости. Геомагнитное поле в этой области имеет почти дипольную форму. Оно образует магнитные ловушки для заряженных частиц. Плазма, появляющаяся в процессе ионизации солнечным ультрафиолетом, накапливается в них до заметных концентраций, в отличие от более высоких широт, что и приводит к появлению плазмосферы.

Предметом нашего исследования являются процессы формирования пространственной трехмерной структуры ионосферы и плазмосферы, и факторы, влияющие на формирование этой структуры.

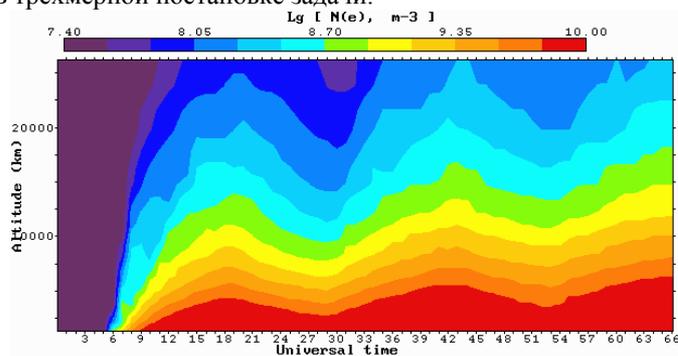
Основные физические процессы, ответственные за формирование плазмосферы, давно известны (Кринберг, Таццлин, 1984) – это дневное заполнение плазмосферы ионосферными ионами и обратное ему поддержание ночной ионосферы ионами из плазмосферы в результате амбиполярной диффузии. Перенос ионов к плазмосфере и обратно может также осуществляться электромагнитным дрейфом и термосферным ветром. Наша работа ставит целью детально изучить вклад каждого из этих процессов в формирование трехмерной пространственной структуры системы плазмосфера-ионосфера.

2. Постановка задачи

Исследование проводилось методом математического моделирования с использованием глобальной теоретической самосогласованной численной модели верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model) (Namgaladze et al., 1998). Модель UAM позволяет произвольно включать и отключать любые физические процессы или изменять их характеристики, чтобы выборочно изучать эффекты порождаемые каждым из них. Это возможно только с использованием глобальных трехмерных теоретических моделей. UAM представляет собой уникальный инструмент, идеально отвечающий требованиям такой задачи.

В данной работе нами рассматривались следующие процессы: фотоионизация и рекомбинация, продольная диффузия ионов, реакции зарядообмена. Ионизация/рекомбинация, амбиполярная диффузия и геометрия магнитного поля являются, как сказано выше, наиболее важными факторами для формирования плазмосферы. Чтобы выделить только их влияние, при моделировании нами были отключены высыпания энергичных электронов, высокоширотная конвекция и ветровое увлечение ионов. Влияние отключенных факторов будет рассматриваться нами в последующих работах. Для устранения долгого эффекта были совмещены географическая и геомагнитная оси Земли. Модельные расчеты проводились для условий равноденствия при низкой солнечной активности. Воздействие на заряженные компоненты верхней атмосферы со стороны нейтральных компонент также были предельно упрощены: симметричная относительно экватора, полученная из NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002) нейтральная атмосфера была "заморожена", т.е. глобальные распределения ее параметров были стационарны в солнечно-магнитной системе координат. Таким образом, задача была полностью симметрична. В начальном состоянии плотность заряженных частиц в ионосфере и плазмосфере была задана очень низкой ($\sim 10^{-3} \text{ м}^{-3}$). Затем с помощью модели UAM воспроизводились процессы диффузионного заполнения и опустошения силовых трубок в трехмерной постановке задачи.

Рис. 1. Заполнение плазмосферы. Изменение плотности плазмы на вертикальном профиле над экваториальной точкой в течение 3 суток модельного времени



3. Результаты модельных расчетов

Мы воспроизвели в своем моделировании 5 первых суток заполнения плазмосферы от практически пустого состояния.

Скорости наполнения плазмосферы, полученные в наших расчетах, близки к известным спутниковым и другим данным (рис. 1). Так же, как в (Кринберг, Тацлин, 1984), можно выделить несколько последовательных стадий процесса: от начального сверхзвукового истечения плазмы в вакуум до приближения к диффузионному равновесию. Заполнение плазмосферы с учетом всех указанных стадий происходит в нашем моделировании в течение нескольких суток, как в (Грингауз, Бассоло, 1990). На различных силовых трубках полученные нами скорости заполнения также соответствуют известным данным. Для $L \sim 4.5$ в наших модельных расчетах концентрация электронов в экваториальной плоскости растет приблизительно на 80 см^{-3} в сутки, что согласуется с (Carpenter et al., 1993). Плотности ионов H^+ и O^+ в экваториальной части трубок с $L \sim 4$ у нас близки к данным (Roberts et al., 1987). Вблизи геостационарной орбиты скорость наполнения у нас близка к данным GEOS-2 (Song et al., 1988) – около 25 см^{-3} в сутки. На коротких трубках с $L < 3$ уже после первых суток устанавливается четкая суточная вариация, что соответствует (Green, Reinisch, 2003).

Это подтверждает, что при всех принятых упрощениях модель остается физически адекватной. Следовательно, можно считать физически осмысленными и воспроизводимыми ей более мелкие структурные особенности процесса формирования системы "ионосфера-плазмосфера".

Внутри сформировавшейся за 5 суток плазмосферы (рис. 2, левый столбец) существуют крупномасштабные трехмерные долгоотно-широтные неоднородности в общей плотности, ионном составе и температуре плазмы (рис. 2 и 3). На высотах ионосферы они наиболее заметно проявляются в послеполуночном секторе в виде трех максимумов электронной концентрации, симметричных относительно экватора (рис. 4): субаврорального, среднеширотного и приэкваториального.

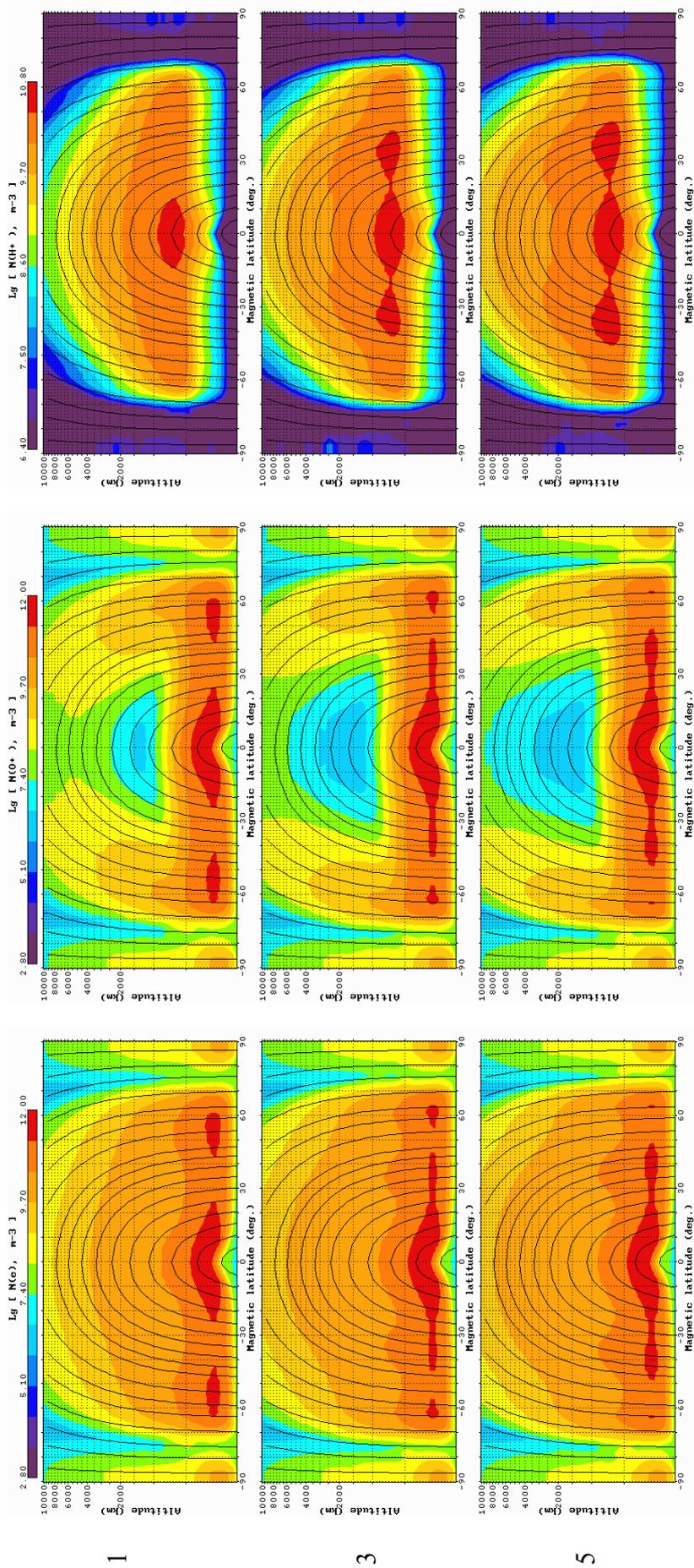


Рис. 2. Формирование структуры системы ионосфера-плазмосфера. Вертикальные разрезы $p(e)$ (слева), $p(O^+)$ (в центре) и $p(H^+)$ (справа) вдоль полуденного меридиана после 1 (верхняя строка), 3 (средняя строка) и 5 (нижняя строка) суток модельного времени

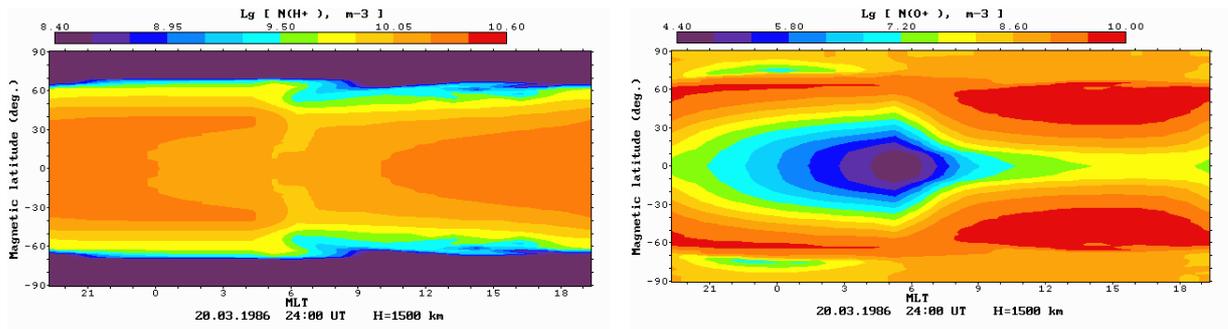
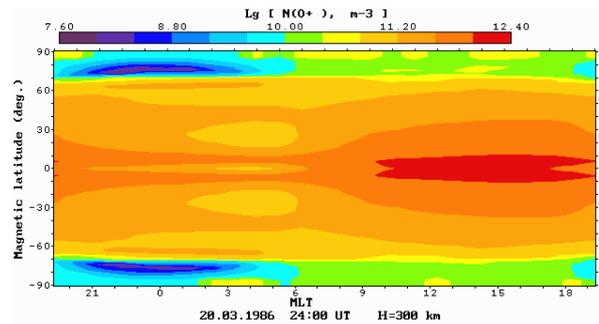


Рис. 3. Пространственная неоднородность ионного состава в нижней части плазмосферы. Горизонтальные разрезы $n(H^+)$ (слева) и $n(O^+)$ (справа) на высоте 1500 км после 5 суток модельного времени

Рис. 4. Горизонтальный разрез $n(O^+)$ в ионосфере на высоте 300 км после 5 суток модельного времени



Напомним, что все эти структурные особенности сформировались в предельно упрощенной постановке задачи, как результат взаимодействия минимального набора физических процессов: ионизации/рекомбинации, зарядообмена и продольной диффузии ионов вдоль линий дипольного магнитного поля. Конкретные механизмы, приведшие к их формированию, подробно рассмотрены ниже.

3.1. Продольные потоки ионов

В первый день модельного времени, когда плазмосфера еще практически пуста, сразу после восхода в нее устремляются мощные потоки ионов O^+ . По мере наполнения верхней части трубок плазмы они затухают. Первоначальное "население" верхней части трубок составляют те же ионы O^+ ионосферного происхождения, но постепенно они замещаются H^+ (скорость замещения пропорциональна концентрации O^+), а O^+ вытесняется обратно вниз. Так, на меридиональных разрезах плазмосферы появляется характерная конфигурация с взаимодополнительными центральной "дырой" в концентрации O^+ и заполненной H^+ плазмосферой (рис. 2).

В последующие сутки в нижней части среднеширотной плазмосферы устанавливается четкий цикл ионных потоков (рис. 5): вверх днем и вниз ночью примерно до высоты 1000 км движутся O^+ , а дальше их продолжают потоки H^+ . Дневные потоки максимальны сразу после восхода и постепенно уменьшаются к вечеру, по мере приближения плотности H^+ в трубках к насыщению. Насыщенная же плотность такова, что обратные потоки в течение всей ночи практически постоянны по интенсивности.

На более длинных приавторальных трубках насыщения H^+ не происходит. Там в течение всего времени модельного расчета существовали только восходящие и нисходящие потоки O^+ , распространявшиеся до высот в несколько радиусов Земли. Но и они разбивались на две характерных

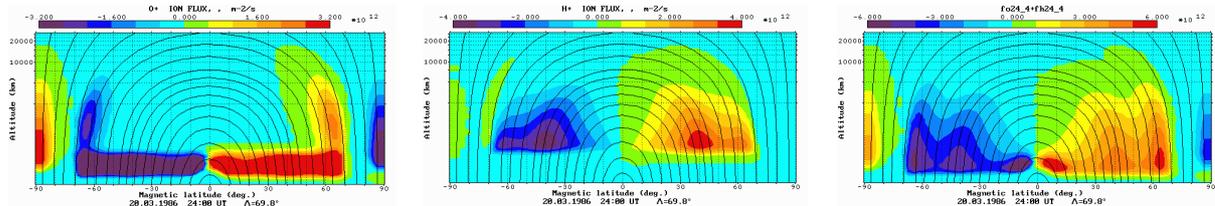


Рис. 5. Ночные продольные потоки ионов O^+ (слева), H^+ (в центре) и суммарный поток (справа). Вертикальный разрез вдоль полуночного меридиана.

В северном полушарии (на рисунках справа) положительное значение потоков соответствует движению ионов вниз, а отрицательное – вверх, в южном полушарии (слева) – наоборот

части: внутривоздушные высокоскоростные потоки наполнения-опустошения верхней части трубок (аналог среднеширотных потоков H^+), прерывающиеся ночью на высотах около 1000 км, где они тормозились атмосферой, а ниже отделенные от них заметной перемычкой внутриионосферные потоки, с меньшей скоростью, но большей концентрацией ионов (рис. 5).

3.2. Субавроральный ночной максимум

Яркой особенностью сформировавшейся структуры является приавроральный ночной максимум, над которым высоко вверх тянутся "рога" повышенной концентрации O^+ . Он образуется в первый день расчета и затем постепенно "тает" со стороны низких широт, по мере накопления в соответствующих трубках "постоянного запаса" ионов H^+ (рис. 2).

Этот максимум связан с сильными продольными потоками ионов O^+ , существующими на приавроральных трубках (рис. 5). Из-за большого объема трубок концентрация плазмы в них остается очень низкой даже после нескольких суток заполнения, и истекающий дневной поток O^+ не встречает препятствий. Поэтому он не тормозится и не затухает, и O^+ в больших количествах поступает днем в верхние части трубок даже на 3-5 сутки, когда на более низких широтах его туда уже не пускает накопившийся H^+ . В результате ионный состав плазмы приавроральных трубок существенно отличается: в них не просто уменьшается концентрация H^+ (провал легких ионов), но и заметно увеличивается концентрация O^+ по сравнению с теми же высотами на более коротких трубках – образуются описанные выше "рога".

Ночные нисходящие потоки на этих трубках тоже отличаются. Ион O^+ намного тяжелее, чем H^+ , и он гораздо эффективнее проникает в плотную атмосферу под действием силы тяжести, когда поток снизу прекращается. Это и порождает повышенные ночные концентрации в приавроральной ионосфере по сравнению с более низкими широтами, где верхние части трубок заполнены хоть и до больших плотностей, но более легкими ионами H^+ . По мере опустошения трубок потоки ослабевают, и концентрация в ионосфере падает. Быстрее это опустошение происходит на трубках меньшего объема, и максимум в течение ночи сужается к более высоким широтам (рис. 3).

Отличием этого максимума является его постепенное уменьшение со временем, вплоть до полного исчезновения. Это вызвано накоплением в соответствующих трубках H^+ , препятствующих движению потоков O^+ , формирующих максимум.

В реальной ионосфере этот максимум оказывается в области конвекции, которая "размывает" его. Поэтому обнаружить его, вероятно, можно лишь в очень спокойных условиях после сильных бурь. Но генетически связанная с ним область повышенной $n(O^+)$ на внешней окраине плазмосферы известна (Horwitz et al., 1986; Roberts et al., 1987; Guiter et al., 1995; и др.). В перечисленных работах показана корреляция между плотностью O^+ в верхней части трубок и широтной вариацией электронной температуры и сделан вывод, что своим существованием этот максимум обязан нагреву фотоэлектронами. Наше моделирование также показало ведущую роль нагрева фотоэлектронами. Но его влияние реализуется

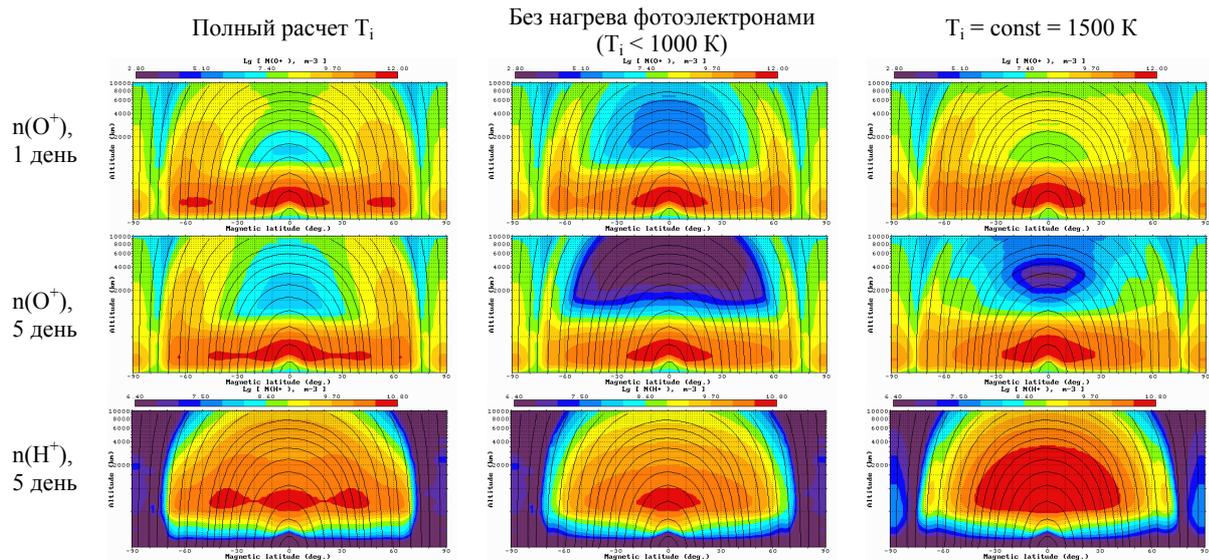


Рис. 6. Влияние нагрева фотоэлектронами и геометрии магнитного поля на формирование области повышенной $n(O^+)$ во внешней части плазмосферы. Вертикальные разрезы вдоль полуночного меридиана для разных вариантов расчета T_i

по нескольким каналам: фотоэлектроны повышают общий уровень электронной и ионной температур в верхней части трубок и порождают их широтный градиент. От температуры же зависит способность ионов O^+ проникать в верхнюю часть слабо заполненных трубок (шкала высот). Даже при отсутствии нелокального нагрева приавторальный максимум $n(O^+)$ все-таки образуется в первый день модельного времени, но быстро исчезает в последующие дни, полностью вытесняясь даже небольшой $n(H^+)$. С другой стороны, если общий уровень температуры достаточно высок, заметные повышения $n(O^+)$ во внешней плазмосфере сохраняются в течение нескольких суток и без широтного градиента T_i , из-за геометрии магнитного поля (рис. 6) – просто из-за ограниченной скорости их переработки в H^+ и быстрого роста объема трубок с широтой на соответствующих высотах во внешних трубках не успевает накопиться достаточно H^+ , чтобы вытеснить оттуда O^+ . Эта зависимость от объема трубок четко видна в виде наклонных изолиний на разрезе $n(O^+)$ на 5-й день моделирования при постоянной $T_i = 1500$ К (рис. 6).

Отметим, что в нашем моделировании не учитывался нагрев плазмосферы сверху – со стороны горячих частиц кольцевого тока, роль которого отмечалась в перечисленных работах наряду с фотоэлектронным нагревом.

3.3. Среднеширотный ночной максимум

Взамен постепенно исчезающего приавторального на средних широтах так же постепенно формируется еще один ночной максимум: на высотах плазмосферы ионов H^+ , а в ионосфере под ним, соответственно, ионов O^+ (рис. 2). Он появляется на 3-5 день расчета, что свидетельствует, что он связан с накоплением ионов H^+ в соответствующих трубках. Этот максимум возникает в области плазмосферы, где наблюдается резкий широтный градиент T_i (в расчетах, где T_i принималась постоянной, он не формируется – см. рис. 6).

Появление этого среднеширотного максимума является результатом совпадения двух факторов. Скорость дневного диффузионного потока ионов, наполняющего трубки, увеличивается с ростом T_i . С другой стороны, объем трубок очень быстро нарастает с широтой. И в области широт $30-40^\circ$ складывается ситуация, что при сравнительно небольшом еще объеме трубок заполняющий их дневной поток ионов достаточно силен, чтобы накопившейся за день плазмы было достаточно для поддержания ночной ионосферы (рис. 7). На более низких широтах для этого не хватает скорости дневного потока (из-за низкой T_i), а на более высоких слишком велик объем трубок, и плотность плазмы остается маленькой.

Существование таких ночных среднеширотных областей повышенного электронного содержания наблюдалось и в экспериментах. В работах (*Knyazeva, Namgaladze, 2008*) их появление объяснялось влиянием ветра. Но результаты настоящей работы показывают, что и структура диффузионных процессов, вызванная неоднородностью T_i , также вносит вклад в их формирование.

3.4. Приэкваториальный ночной максимум

В приэкваториальной области уже в первый день появляется максимум концентрации O^+ , который практически не изменяется далее. На меридиональных разрезах он имеет аркообразную форму (рис. 2). Наиболее ярко он выражен в ночное время, а днем почти теряется в плотной ионосфере. Высота максимума концентрации ионов O^+ над экватором составляет ~ 380 км, в то время как на средних широтах она почти на 100 км меньше.

На глобальной карте распределения максимальной электронной концентраций в F2-слоя (*NmF2*) (рис. 8, правая карта) в этой области можно видеть структуру, аналогичную экваториальной аномалии, с гребнями, проецирующимися на геомагнитные широты $\sim 10^\circ$, и разделенными провалом между ними. В этой серии расчетов она образовалась исключительно за счет процессов диффузии вдоль силовых линий геомагнитного поля, без участия электромагнитного дрейфа и вызываемого им фонтан-эффекта.

Формирование ее мы объясняем следующим образом. Трубки, на которых он формируется, имеют малую длину и малый объем. Поэтому в течение дневного времени ионы O^+ в них успевают накопиться "до состояния насыщения" (до установления диффузионного равновесия).

В ночные часы под действием процессов рекомбинации концентрация плазмы в нижней части F2-области убывает, что приводит к нарушению диффузионного равновесия. Но из-за малого наклона силовых линий процесс опустошения низкоширотных трубок протекает значительно медленнее, чем среднеширотных. Поэтому высокая концентрация ионов O^+ сохраняется здесь в течение всей ночи.

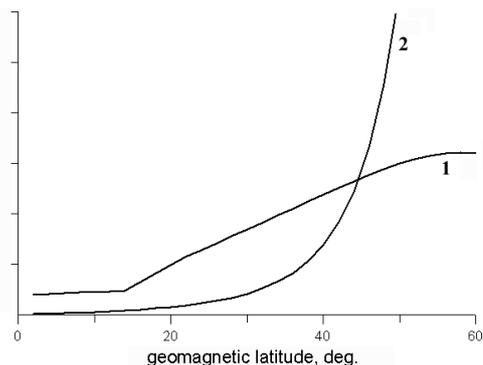


Рис. 7. Широтная зависимость:
1 – T_i в вершине трубок
2 – объема трубок

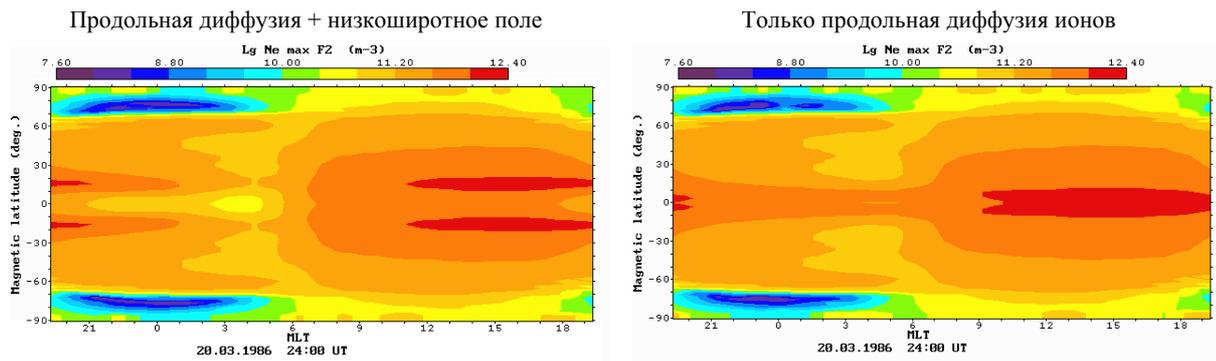


Рис. 8. Влияние низкоширотного электрического поля на форму приэкваториального максимума. Широтно-долготное распределение $NmF2$

Еще более короткие трубки, с другой стороны, целиком находятся в области более плотной нейтральной атмосферы – больших скоростей рекомбинации и за ночь опустошаются полностью. Так возникает описываемый максимум.

Для сравнения образовавшейся структуры с классической экваториальной аномалией мы добавили в следующей серии расчетов учет низкоширотного электрического поля. Суточный ход электрического потенциала мы приняли в соответствии с (Crain *et al.*, 1993): максимум около 06:00 LT, минимум около 21:00 LT и амплитуда суточной вариации 16 кВ. Действие электрического поля привело к тому, что гребни раздвинулись от экватора на более высокие широты, а перемычка плотной плазмы над экватором исчезла. В послеполуночные часы описываемый максимум исчезает практически полностью, в результате чего над экватором формируется широкий провал (рис. 8, слева). На дневной стороне значения $n(e^-)$ на высотах F2-области стали выше, чем в расчетах без учета электромагнитного дрейфа, что отчетливо видно на широтах 20°-30°. На вертикальном разрезе ионосферы вместо единичного максимума $n(O^+)$ над экватором формируются плоская вершина или два горба, разделенные провалом. Все это соответствует известным представлениям об аномалии Эпплтона.

4. Заключение

Таким образом, методом математического моделирования с использованием глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM мы воспроизвели процесс диффузионного заполнения плазмосферы в полностью симметричной относительно экватора постановке задачи: для момента равноденствия и совпадающих магнитной и географической осей. Из всех процессов переноса учитывалась только продольная диффузия ионов. Показано, что даже в столь упрощенной постановке основные характеристики процесса соответствуют наблюдаемым в реальной природе.

В результате нашего моделирования сформировалась пространственно неоднородная и нестационарная плазменная оболочка Земли с рядом крупномасштабных трехмерных структурных особенностей в общей плотности плазмы и ионном составе. Наиболее заметными среди них являются три ночных ионосферных максимума $n(e^-)$ в приавторальных, средних и приэкваториальных широтах и связанные с ними плазмосферные области повышенной $n(O^+)$ во внешней части плазмосферы и повышенной $n(H^+)$ на средних широтах.

Исследование механизмов их появления показало, что, наряду с геометрией магнитного поля, определяющий вклад в формирование этих особенностей дает пространственная неоднородность ионной температуры, в основном определяемая нелокальным нагревом фотоэлектронами.

Авторы благодарят проф., докт. физ.-мат. наук Намгаладзе Александра Андреевича за полезные замечания, которые позволили улучшить качество представления и изложения результатов работы.

Литература

- Carpenter D.L., Giles B.L., Chappell C.R., Decreau P.M.E., Anderson R.R., Persoon A.M., Smith A.J., Corcuff Y. Plasmaspheric dynamic in the duskside bulge region: A new look at an old topic. *J. Geophys. Res.*, v.98, p.19243-19271, 1993.
- Carpenter D.L. Whistler evidence of a "knee" in the magnetospheric ionization density profile. *Res. Geophys.*, v.68, p.1675, 1963.

- Carpenter D.L.** Whistler studies of the plasmapause in the magnetosphere. I: Temporal variations in the position of the "knee" and some evidence on plasma motions near the "knee". *J. of Geoph. Res.*, v.71, p.693-709, 1966.
- Crain D.J., Heelis R.A., Bailey G.J., Richmond A.D.** Low-latitude plasma drifts from a simulation of the global atmospheric dynamo. *J. of Geoph. Res.*, v.98, A4, p.6039-6046, 1993.
- Horvitz J.L., Brace L.H., Comfort R.H., Chappell C.R.** Dual-spacecraft measurement of plasmasphere-ionosphere coupling. *J. of Geoph. Res.*, v.91, p.11203, 1986.
- Green J.L., Reinisch B.W.** An overview of results from the RPI on IMAGE. *Space Sci. Rev.*, v.109, p.183-210, 2003.
- Guiter S.M., Moore T.E., Khazanov G.V.** Modeling of O⁺ ions in the plasmasphere. *J. of Geoph. Res.*, v.100, A11, p.21921-21928, 1995.
- Knyazeva M.A., Namgaladze A.A.** The influence of the northward wind on the latitudinal location of the enhanced electron density regions in the night-time ionospheric F2-layer and plasmasphere of the Earth. *Problems of Geocosmos: Proceedings of the 7th International Conference (St. Petersburg, Petrodvorets, 26-29 May 2008), St. Petersburg, 2008.*
- 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.
- 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, p.1468, 2002.
- Roberts W.T., Horvitz J.L., Comfort R.H., Chappell C.R., Waite J.H., Green J.L.** Heavy ion density enhancements in the outer plasmasphere. *J. of Geoph. Res.*, v.92, p.13499, 1987.
- Song X., Gendrin R., Caudal G.** Refilling process in the plasmasphere and its relation to magnetic activity. *J. Atmos. Terr. Phis.*, v.50, p.185-195, 1988.
- Грингауз К.И., Бассоло В.С.** Структура и свойства плазмосферы Земли. Экспериментальные данные и проблема их интерпретации (Обзор). *Геомагнетизм и Аэронавигация*, т.30, № 1, с.1-17, 1990.
- Грингауз К.И., Безруких В.В., Озеров В.Д.** Результаты измерений концентраций положительных ионов в ионосфере методом ионных ловушек на третьем советском спутнике Земли. *Искусственные спутники Земли*, т.6, с.63-100, 1961.
- Кринберг И.А., Тащилин А.В.** Ионосфера и плазмосфера. М., Наука, 190 с., 1984.