

УДК 621.371

СОЛНЕЧНЫЙ ТЕРМИНАТОР И ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ (ОБЗОР)

© 2011 г. В. М. Сомсиков

*Институт ионосферы, АО “Национальный Центр космических исследований и технологий”, Алматы, Казахстан
e-mail: vmsoms@rambler.ru*

Поступила в редакцию 27.05.2009 г.
После доработки 17.01.2011 г.

Приведен аналитический обзор теоретических и экспериментальных результатов исследований солнечного терминатора как источника неоднородных структур атмосферы. Предложена классификация механизмов генерации волн и неоднородностей атмосферы, дано их краткое описание. Рассмотрен ряд актуальных задач, связанных с дальнейшим изучением солнечного терминатора и создаваемых им эффектов в околоземном космическом пространстве.

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечный терминатор (СТ) как регулярный источник волновых возмущений атмосферы, включая ионосферу и магнитосферу, привлек к себе внимание в начале 70-х годов прошлого века. Сначала СТ обратил на себя внимание как область, которая существенно влияет на распространение радиоволн [Crombie, 1964]. Поскольку в области СТ возникает резкое изменение физических условий полета космических аппаратов, его изучение оказалось актуальным в связи с освоением околоземного космического пространства. Более того, генерируемые СТ неоднородные структуры атмосферы, так или иначе, проявляют себя практически в течение всего времени суток. Поэтому его изучение стимулировалось необходимостью учета в атмосферных моделях, как морфологических особенностей самой области СТ, так и создаваемых им неоднородных структур. В последние годы актуальность исследований СТ возросла в связи с проблемами глобального изменения климата [Смирнов, 1975; Tobias, 2008]. Действительно, потоки радиации в атмосфере наиболее резко меняются в переходные часы суток. Поэтому СТ интересен в качестве природного стенда для изучения различных свойств атмосферы, которые проявляются при регулярном и достаточно резком изменении потока солнечной радиации.

Поскольку роль СТ в физике атмосферы значительна, то изучению связанных с ним эффектов уделяется большое внимание. Однако, к сожалению, с момента публикации первой монографии и обзора по этой проблеме уже прошло около 20-ти лет [Сомсиков, 1983; 1991]. За это время накопилось много как теоретических, так и экспериментальных результатов исследований СТ. Основные результаты, прежде всего, связаны с экс-

периментальным изучением ионосферных и магнитосферных эффектов в области СТ с помощью космических аппаратов, уточнении его роли в распространении радиоволн, а также с развитием нового направления – физики неравновесной атмосферы.

Предлагаемый обзор посвящен обобщению теоретических и экспериментальных результатов изучения процессов и эффектов, создаваемых СТ в атмосфере, начиная от поверхности Земли и кончая магнитосферными высотами. В нем приведено краткое описание теории и классификация механизмов генерации неоднородностей, создаваемых СТ во всей толще атмосферы. Изложены результаты исследований неравновесных эффектов СТ. Особое внимание уделено спутниковым методам изучения эффектов в ионосфере на основе GPS. Предложен ряд задач в области дальнейшего изучения СТ и создаваемых им эффектов в атмосфере.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОБЛАСТИ СТ

СТ – это движущаяся граница света и тени, разделяющая всю атмосферу Земли на ночную и дневную области с различными значениями температуры, плотности и т. п. Главной особенностью СТ, как источника возмущений атмосферы, является глобальность и отличие его восходной и заходной областей. Действительно, во время восхода Солнца происходят мощные фотоионизационные процессы, процессы нагрева атмосферы. Заходная же область СТ, напротив, определяется релаксационными процессами при уменьшении поступающего в атмосферу потока солнечной радиации. Поэтому характерная ширина восходной области СТ значительно меньше характерной

ширины заходной области. Это обуславливает, в частности, более высокочастотный спектр генерируемых СТ возмущений атмосферы в восходные часы, чем в вечерние [Сомсиков, 1983].

Уже первые экспериментальные исследования эффектов в атмосфере показали, что СТ существенным образом влияет на динамику всей ее толщи, вызывая в ней разнообразные явления. Это, прежде всего, обусловлено тем, что в области СТ происходит резкое изменение потока солнечной энергии и соответствующее изменение всех параметров атмосферы.

Первое упоминание об СТ как об источнике возмущений атмосферы, пожалуй, было сделано в 1973 г. [Beer, 1973]. В этой работе высказано предположение о возможности генерации звука в атмосфере при сверхзвуковом движении СТ. Затем в 1975 г. впервые было предложено теоретическое доказательство того, что СТ может быть источником акустико-гравитационных волн (АГВ) как при сверхзвуковом, так и дозвуковом его движении [Сомсиков и Троицкий, 1975]. В дальнейшем эта теория генерации волн СТ нашла свое развитие в работах [Сомсиков, 1977; Beer, 1978; Cot and Teitelbaum, 1980; Сомсиков, 1983]. Общий вид системы уравнений для генерируемых СТ АГВ может быть представлен следующим образом [Сомсиков, 1983; 2005]:

$$\partial \rho / \partial t = -\nabla(\rho v), \quad (1)$$

$$\rho \partial v / \partial t + \rho(v \nabla) v = -\nabla p + \rho g + F, \quad (2)$$

$$\{\partial / \partial t + v \nabla\} (p - c^2 \rho) = S, \quad (3)$$

$$p = \rho RT, \quad (4)$$

где t – время; ρ – плотность атмосферного газа; T – температура; v – скорость переноса газа; p – давление; g – ускорение свободного падения; $c = (\gamma RT)^{1/2}$ – скорость звука; R – газовая постоянная; S – приток тепла в единицу объема за единицу времени; F – внешние силы.

Из-за глобальности СТ уравнения (1–4) необходимо решать в сферической системе координат. В приближении $R_E \gg z$, где R_E – радиус Земли, z – высота над поверхностью Земли, в сферической системе координат уравнения (1–3) принимают вид [Somsikov, 1987]:

$$Dp + \frac{\partial}{\partial z} w + 2 \frac{w}{R_E} + \frac{\partial(v \sin \theta)}{R_E \partial \theta} + \frac{\partial u}{R_E \sin \theta \partial \phi} = 0, \quad (5)$$

$$Dw - 2\Omega u \sin \theta = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + F_1, \quad (6)$$

$$Dv - 2\Omega u \cos \theta = -\frac{\partial p}{R_E \partial \theta} + F_2, \quad (7)$$

$$Du + 2\Omega v \cos \theta + 2\Omega w \sin \theta = -\frac{\partial p}{R_E \sin \theta \partial \phi} + F_3, \quad (9)$$

$$D(p - c^2 \rho) + \eta w = S. \quad (10)$$

Здесь z, θ, ϕ – высота над поверхностью Земли, широта и долгота соответственно; Ω – угловая скорость вращения Земли; $\eta = g(\gamma - 1)$; $D = \partial / \partial t + \Omega \partial / \partial \phi$; w, u, v – возмущения потоков воздуха по вертикали, долготе и широте соответственно; $\gamma = c_p / c_v$; c_p, c_v – теплоемкости при постоянном давлении и объеме соответственно; $H = c^2 / (g\gamma)$ – так называемая высота однородной атмосферы; F_1, F_2, F_3 – сторонние силы, связанные с различными факторами.

Представляя в линейном приближении искомые функции (5–10) в виде разложения по гармоникам $f = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} F_{l\omega}(\theta, z) \exp(i\omega t) d\omega \right) e^{il\phi}$, для возмущения давления с учетом малости так называемых синусных членов, будем иметь

$$[L + \Phi] p_{l\omega} = N S_{l\omega}. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } L &= \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\gamma}{H} \left(1 + \eta \frac{H_z}{\tau \gamma} \right) \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\lambda^2}{c^2} \left(1 + \frac{g H_z}{\tau} \right); \\ N &= -\frac{i}{\lambda H} \left[\frac{\partial}{\partial z} + \frac{\lambda^2}{g} \left(1 + H_z \frac{g}{\tau} \right) \right]; \lambda = \omega + i\Omega; \\ \Phi &= \frac{\lambda^2 - \omega_g^2}{R_e (\lambda^2 - K^2)} \left[\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - \text{ctg} \theta \left(1 - \frac{8\Omega^2 \sin^2 \theta}{\lambda^2 - K^2} \right) \frac{\partial}{\partial \theta} - \frac{l^2}{\sin^2 \theta} - \frac{2l\Omega(\lambda^2 + K^2)}{\lambda(\lambda^2 - K^2)} \right]; H_z = \frac{\partial H}{\partial z}; i - \text{мнимая единица}; \omega_g = (\lambda - 1)^{1/2} g/c - \text{частота Брента-Вайсяля}; l = 1, 2, 3, \dots; K = 2\omega \cos \theta; \omega - \text{частота}. \end{aligned}$$

Опуская промежуточные выкладки, в приближении, диктуемом характерными размерами СТ, получим решение уравнения (11) для возмущения давления атмосферного газа [Somsikov, 1987]

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{4\pi^2} \exp\left(-\frac{\gamma z}{2H}\right) \sum_{l=-\infty}^{\infty} \exp[il(\phi - \Omega t)] \times \\ &\times \left\{ \sum_{n=|l|}^{\infty} \Lambda P_l^n(\cos \theta) \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} G(z/z_0) S_b dz_0 + p_0 \right\} \times \\ &\times \exp(i\lambda t) d\lambda. \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } \Lambda &= \frac{(2n+1)(n-1)!}{(n+1)!}, \quad n = l, l+1, l+2, \dots; \\ P_l^n(\cos \theta) &- \text{полиномы Лежандра}; G(z/z_0) - \text{функ-} \end{aligned}$$

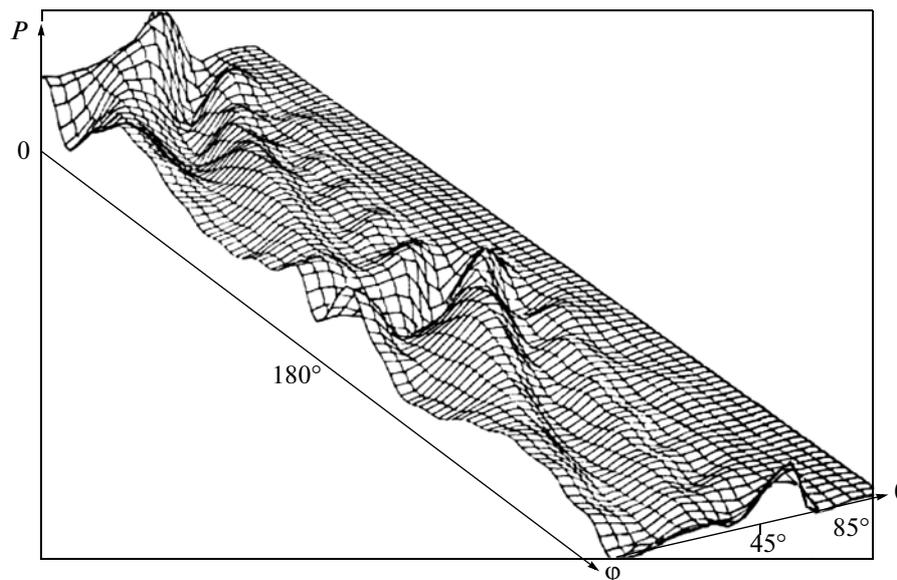


Рис. 1. Результаты численных расчетов создаваемого СТ регулярного глобального волнового поля давления атмосферы в зависимости от широты и долготы на высоте 120 км ([Курмангалиев и др. 1989]).

ция Грина, определяемая сферической моделью СТ, S_b – гармоника разложения функции источника по сферическим функциям, p_0 – невозмущенная гармоника давления атмосферы.

На рисунке 1 приведен пример результатов расчета возмущения давления, генерируемого сферической моделью СТ, выполненных по формуле (12), когда функция источника определяется притоком тепла в атмосферу [Курмангалиев и Сомских, 1989].

На высотах ионосферы, где ионизованная составляющая газа становится значительной, силы F_1 , F_2 , F_3 имеют электродинамический характер [Гершман, 1974; Сомских, 1988; Ермакова et al., 2000]. В общем случае они имеют вид $F_i = \rho_i E + [j_i B]$, где B – внешнее магнитное поле; E – электрическое поле; ρ_i – плотность зарядов для i -й компоненты заряда; j_i – ионосферный ток i -й компоненты плазмы. Выражение для тока имеет вид [Гершман, 1974]

$$j = \sigma_e \left\{ h[(Eh) + (\nabla p_e h / (eN))] + \frac{v_e v_{in}}{\omega_e \omega_i} \left(E + \frac{\nabla p_e}{eN} \right) - \frac{v_e v_{in}^2}{\omega_e \omega_i^2} \left[Eh + \frac{[\nabla p_e \times h]}{eN} \right] \right\}, \quad (13)$$

где v_{in} – характерная частота столкновений ионов с нейтральной компонентой газа; h – единичный вектор магнитного поля Земли; v – скорость заряженной компоненты; $v_p = \nabla p_e / (eN |B|)$; p_e – давление электронного газа; e – заряд электрона; N –

электронная концентрация; ω_e , ω_i – гирочастоты электронов и ионов соответственно; $\sigma_e = \frac{e^2 N}{m_e v_e}$ – электронная проводимость; m_e – масса электрона; v_e – частота столкновений электронов с нейтральными частицами.

Выше 200 км выражение для электромагнитных сил можно написать в упрощенном виде

$$F_i = \rho_i E + [j_i B] \approx \rho_i v_{in} \{ h(vh) - v + [v_p \times h] \}. \quad (14)$$

Согласно формуле (14) силы, обусловленные движением электронного газа в магнитном поле Земли, пропорциональны N . Поэтому влияние магнитогидродинамических членов на пространственно-временные характеристики вариаций N максимальны в дневные часы суток.

В работе [Водяников и др., 1982] в соответствии с формулой (14) выполнены расчеты спектров волн, генерируемых СТ на разных широтах с учетом магнитоионного торможения. Показано, что выше 300 км наиболее благоприятной областью генерируемых СТ волн в интервале масштабов 100–1000 км, является приэкваториальная зона. Кроме того, было найдено, что в области экватора появляется новая ветвь незатухающих плазменных колебаний.

В общем случае магнитогидродинамические силы зависят от очень многих факторов. Это скорость ветра, его направление относительно магнитного поля, частота столкновения электронов с нейтральными частицами, градиенты давления электронного газа и т.п. В среднем наличие этих сил приводит к увеличению частоты колебаний с ростом N . Этот эффект подтверждается наблюде-

ниями [Сомсиков, 1983]. Кроме того, в области СТ, например, в восходные часы суток, из-за увеличения потока солнечной радиации должно наблюдаться увеличение амплитуд гармоник возмущений. Этот эффект имеет место для тех гармоник, для которых инкремент затухания, обусловленный магнитоионным трением, меньше характерного параметра, определяющего скорость нарастания электронной концентрации.

В последующих работах было установлено, что в результате нелинейных процессов в области СТ могут возникать и мелкомасштабные неоднородности, в частности, турбулентность [Sekar and Raghavarao, 1987; Ronchi et al., 1991; Сомсиков, 1991; 1992; Somsikov, 1995; Hu and Bhattacharjee, 1999]. В основах теории генерации турбулентности в атмосфере в области СТ использовались фундаментальные результаты, полученные в работах [Обухов, 1988].

Теория генерации магнитогидродинамических волн СТ в магнитосфере нашла свое дальнейшее развитие в таких работах, как [Huba et al., 2000; Leonovich et al., 2006].

На высотах >1000 км описание плазмы в рамках магнитной гидродинамики сталкивается с проблемами разреженности газа. Это связано с тем, что длина свободного пробега частиц на больших высотах становится соизмеримой с характерными масштабами задачи. Поэтому для описания динамических процессов здесь следует опираться на кинетическое уравнение Больцмана для плазмы, согласованное с уравнениями Максвелла. Их можно записать так:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + v \frac{\partial f_i}{\partial \vec{r}} + e_i \{E + [vB]\} \frac{\partial f_i}{\partial P_i} = 0, \quad (15)$$

$$\text{rot } B = \frac{1}{c_i^2} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon_0 c_i^2} j, \quad \text{rot } E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (16)$$

$$\text{div } E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad \text{div } B = 0.$$

Здесь f_i — функция распределения i -й компоненты плазмы; ε_0 — диэлектрическая проницаемость плазмы; c_i — скорость света.

Как правило, с помощью выражений (15, 16) находится первый член возмущения функции распределения $f_i = f_{0i} + \delta f_i$, а отсюда определяют возмущения параметров ионосферной плазмы

$$\rho = \sum_i e_i \int \delta f_i dP, \quad j = \sum_i e_i \int v \delta f_i dP. \quad (17)$$

Данный подход позволяет определить вид неоднородностей параметров плазмы, включая электрические и магнитные поля, создаваемых СТ, а также их устойчивость. Характер неустойчивостей определяется с помощью расчетов диэлек-

трической проницаемости [Арцимович и Сагдеев, 1979].

3. КЛАССЫ ВОЗМУЩЕНИЙ

В целом все возникающие при перемещении СТ колебания атмосферы можно разделить на два класса: класс регулярных и класс нерегулярных возмущений.

Класс регулярных возмущений — наиболее важный. К этому классу относятся возмущения, которые остаются после усреднения по всем флуктуациям параметров атмосферы. В зависимости от характера движения СТ механизм возбуждения им регулярных волн относится либо к механизму Вавилова—Черенкова, либо к переходному механизму [Зельдович и Райзер, 1966; Васильев и Калинин, 1983; Васильев, 1987]. Подробный математический анализ механизмов для СТ и численные расчеты генерируемых им волновых полей возмущений параметров атмосферы можно найти в работах [Сомсиков, 1977; 1980; 1983; 1985; 1988]. Эти механизмы впервые нашли свое подтверждение в экспериментальных работах [Ямпольский, 1978; Джалагания, 1980; Белей и др., 1983; Антонова и др., 1988; Васильев и Шубова, 1990; Ивлев и Максименко, 1991; Аубакиров и др., 1992; Гоков и Гритчин, 1994]. Суть основных механизмов заключается в генерации волн движущимися градиентами параметров атмосферы создаваемыми градиентом потока солнечной энергии в области СТ. При этом наиболее интенсивно возбуждаются те волны, масштабы которых соизмеримы с характерными масштабами неоднородностей параметров атмосферы в области СТ. В соответствии со структурой СТ возникающие в ионосфере возмущения средних масштабов вытянуты вдоль линии СТ. На высотах ~100 км их структура подобна плазменным каналам, с характерными масштабами по вертикали ~10 км, а в направлении движения СТ ~100 км (см. рис. 2) [Сомсиков, 1983]. Наличие такой структуры в ионосфере подтверждается фактами наблюдаемого улучшения сверхдальней радиосвязи в случае, когда радиотрасса проходит вблизи к линии СТ [Голян, 1980].

В области СТ возможен так называемый радиационный механизм возбуждения волн [Сомсиков, 1986]. Он обусловлен градиентом коэффициента поглощения радиации атмосферы в восходные часы. Этот градиент может привести к возникновению значительной вертикальной компоненты дивергенции горизонтального потока поглощаемой атмосферой радиации, который, в свою очередь, приводит к появлению градиентно-радиационной неустойчивости. Ее природу можно пояснить так. Если какой-либо элемент атмосферы, например, под воздействием внешней волны, переместится в область с большим

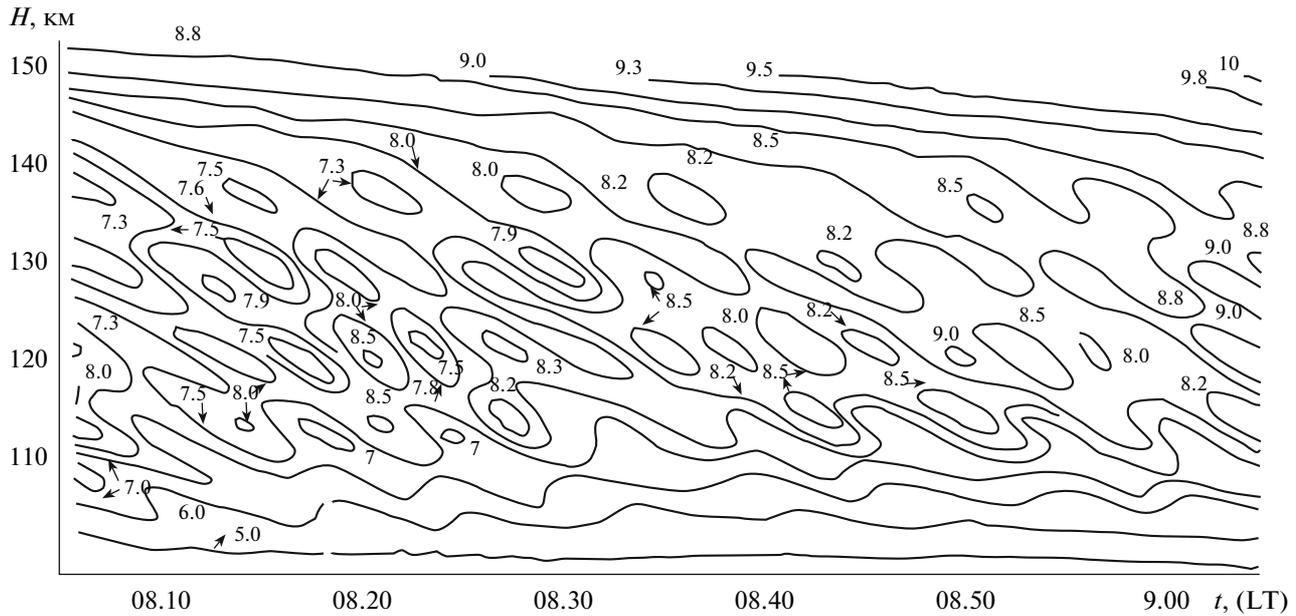


Рис. 2. Изолинии электронной концентрации на высотах 100–150 км ионосферы, возникающие в результате прохождения СТ.

значением потока радиации, то он нагреется и расширится. Если его расширение окажется достаточным, то этот элемент начнет всплывать. Поскольку при этом он попадает в область более сильного нагрева, то такой процесс становится экспоненциально неустойчивым. Критерий градиентно-радиационной неустойчивости имеет вид [Сомсиков, 1986]:

$$g/c_p + \partial T/\partial z - \tau_0 [\partial(\alpha S)/\partial z]/(\rho c_p) < 0, \quad (18)$$

где τ_0 – период внешней волны; α – коэффициент поглощения радиации. Согласно оценкам, радиационная неустойчивость может возникнуть в утренние часы в термосфере.

Существуют и другие, более сложные механизмы образования регулярных неоднородностей. Так, сравнительно большое значение горизонтальной компоненты градиента давления электронов или температуры в области СТ приводит к возникновению вертикальных потоков плазмы, направленных утром вверх, а вечером вниз. Такие потоки способствуют усилению плазменных неустойчивостей [Hu et al., 1999]. В районе экватора вертикальные потоки могут являться источником возмущений в переходные часы суток [Ronchi et al., 1991]. Участие неустойчивости Релея–Тейлора в образовании волновой структуры подтверждается спутниковыми измерениями низкоширотных и среднеширотных возмущений концентрации плазмы и электронной температуры на высотах ~900 км после захода Солнца [Forbs et al., 2008]. Возмущения с масштабами ~1 км в токовой экваториальной струе, обнаруженные с по-

мощью радара обс. Джикамарка, объясняются градиентно-дрейфовой неустойчивостью в области СТ [Chau and Husell, 2004]. Градиентно-дрейфовая неустойчивость служит причиной возникновения мелкомасштабных возмущений N в F-области полярной ионосферы. Генерации волновых возмущений в тропосфере также способствует усиление мезомасштабной турбулентности в области СТ [Гаврилов, 1997].

На высотах ~1000 км преобладают ионизованные компоненты газа. Это приводит к генерации ионного звука в переходные часы суток с характерными периодами ~10 мин в течение 1–3 ч. В механизме генерации ионного звука существенную роль играют вертикальные диффузионные потоки заряженных частиц, возникающие в области ионосферных высот во время восхода Солнца [Huba et al., 2000; Gel'berg et al., 1978; Гдалевич и др., 2006]. Вблизи экватора наличие токовой струи приводит к генерации во время прохождения СТ значительного многообразия плазменных неоднородностей [Sudha and Krishna, 1997].

В осенне-зимний период перед восходом Солнца на высотах 200–400 км возникают изменения всех параметров ионосферной плазмы, обусловленные потоком фотоэлектронов вдоль магнитных силовых линий из магнитосопряженной области в момент прохождения через нее СТ. Область таких вариаций параметров плазмы, перемещающуюся в соответствии с движением СТ, предложено назвать магнитосопряженным терминатором (МСТ). МСТ также служит источником возмущений плазмы с механизмами генера-

ции, подобными СТ [Сомсиков, 1983; 1991; Abramchuk et al., 1987]. Помимо генерации волн при движении МСТ, возможна передача магнитогидродинамических волн вдоль магнитно-силовой трубки. Уже имеются экспериментальные подтверждения усиления таких возмущений в области МСТ в зимние периоды [Ruzhin et al., 2009; Afraimovich et al., 2009]. Обнаружены факты генерации так называемых “плазменных пузырей”, генерируемых в вечерние часы в магнитосопреженной области магнитосферы, перемещающиеся со скоростью ~ 100 м/с и имеющие характерные масштабы ~ 200 – 300 км [Tadahiko et al., 2005].

Класс нерегулярных возмущений, генерируемых СТ, связан с наличием локальных неоднородностей атмосферы, неоднородностей рельефа земной поверхности, с вариациями интенсивности солнечной радиации, например, во время вспышек на Солнце и т.п. При их наличии возникают нестационарные волны, а также изменения структуры регулярных волновых возмущений, генерируемых СТ. Механизмы генерации нерегулярных возмущений, главным образом, связаны с резким изменением притока тепла в атмосферу из-за этих неоднородностей при прохождении через них СТ [Васильев и Калинин, 1983; Somsikov, 1995]. Характерные пространственно-временные масштабы и амплитуды возмущений определяются пространственно-временными масштабами неоднородностей и характером их взаимодействия с СТ. Сами механизмы генерации волн этими неоднородностями аналогичны таким механизмам, как например, затмение Солнца [Altadill et al., 2001]. Поэтому для расчетов возмущений, создаваемых неоднородностями во время движения СТ, можно использовать систему уравнений (1–10), если в качестве источника волн подставить в правую часть уравнения энергии функцию, соответствующую рассматриваемой неоднородности.

При генерации волн значительными оптическими неоднородностями может возникнуть нелинейное дробление волновой структуры [Сомсиков, 1986; 1991]. Критерий такого дробления следующий: $\mu^n / (n!) \geq 1$, где n – число гармоник, на которое дробится эта неоднородность, $\mu = \alpha S t_0 / c$; t_0 – характерное время неоднородности. Период n -й гармоники определяется условием $T_n \sim t_0 / n$. Оценки показывают возможность такого механизма дробления в озоновом слое.

В целом, как правило, масштабы нерегулярных возмущений существенно меньше возмущений регулярного класса, так как они определяются различного рода неустойчивостями в области неоднородностей атмосферных параметров и характерными масштабами этих неоднородностей.

Обобщая механизмы генерации волн в области СТ, можно отметить следующее.

– Наиболее интенсивные и регулярно создаваемые СТ возмущения атмосферы наблюдаются с периодами от нескольких минут и до нескольких часов. Характерные масштабы возмущений определяются масштабами неоднородностей атмосферных параметров в области СТ. В нижних слоях атмосферы образуются АГВ. На больших высотах, где атмосфера находится в плазменном состоянии, возникают магнитогидродинамические волны.

– Генерация волновых возмущений плазмы в области МСТ связана с потоком энергии из области СТ в магнитосопреженную область другого полушария Земли вдоль магнитных силовых линий и с возникающими при этом в ионосфере градиентами параметров плазмы.

– Образование нестационарных мелкомасштабных неоднородных структур в области СТ обусловлено локальными неоднородностями атмосферы, нелинейными эффектами, а также конвективными, градиентно-радиационными и другими плазменными неустойчивостями.

4. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ АТМОСФЕРНЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СТ

При изучении и моделировании динамических процессов в атмосфере, как правило, используются уравнения равновесной газодинамики в термодинамическом приближении. Солнечная радиация считается внешним фактором, определяющим состояние равновесной атмосферы, либо, как в случае СТ или солнечного затмения, являющаяся источником АГВ. При этом члены, определяющие взаимосвязь параметров атмосферы с интенсивностью поглощаемой солнечной радиации, в уравнения не входят. Но в процессе изучения СТ и построения эволюционной динамической модели атмосферы, учитывающей взаимосвязь параметров атмосферы с внешними факторами, выясняется ограниченность такого упрощенного подхода. Действительно, все динамические процессы в атмосфере в той или иной степени определяются энергетическим обменом между атмосферным газом и радиацией. И хотя внутренняя энергия атмосферы гораздо больше энергии поступающей радиации, кинетическая энергия атмосферных процессов сравнима с ней [Изаков, 1997; Essex, 1984; Голицын и Мохов, 1978; Черногор, 2003]. Об этом также свидетельствуют расчеты производства энтропии в атмосфере, приходящей и уходящей радиации [Essex, 1984]. Изменение распределения тепла в атмосфере приводит к сезонной зависимости ее потенциальной энергии, что также сказывается на динамических свойствах атмосферы [Сомсиков и др., 2004]. Поэтому при создании эволюционной модели атмосферы, определяемой пространственно-временными вариациями ее состава

ва и внешних воздействий, атмосферу следует рассматривать как совокупность двух взаимосвязанных составляющих — атмосферный газ и радиация. Это удастся сделать, если опираться на самосогласованные неравновесные уравнения термодинамики, включающие в себя уравнение для потока радиации [Румер и Рывкин, 1977; Сомников, 2001].

В первых работах по изучению СТ, в которых атмосферный газ рассматривался в совокупности с солнечной радиацией, было обнаружено, что при определенных значениях параметров атмосферы и радиации возможно возникновение градиентно-радиационной неустойчивости [Архипов и др., 1999]. Оказалось, что ее инкремент сложным образом зависит от параметров атмосферы и гео-гелиофизических факторов. Так, было установлено, что при положительных значениях градиента поглощаемой солнечной радиации возможен резонанс в инкременте при частоте равной частоте Брента—Вяйсяля. В этом случае инкремент неустойчивости соизмерим с частотой волны, что делает возможным возникновение турбулентности.

Самосогласованные уравнения динамики системы газ—солнечная радиация записываются в рамках неравновесной термодинамики. Эта система уравнений, помимо уравнений равновесной газодинамики, включает в себя уравнение для потока солнечной радиации, а в уравнение энергии добавляются члены, учитывающие обмен энергией между газом и радиацией [Антонова и др., 2006]. В работе [Сомников и Нургалиева, 2007] приведены результаты расчетов изменений в спектральном составе атмосферных волн, обусловленных процессами обмена энергией между атмосферным газом и радиацией. Оценки спектров волн выполнялись на основе дисперсионного соотношения, которое для системы атмосферный газ—радиация имеет вид

$$\begin{aligned} \omega^4 + \frac{4\sigma T_0^3}{\rho_0 c_v} i (H_T k^2 + i k_z) \omega^3 - g\gamma (H k^2 - i k_z) \omega^2 + \\ + \frac{4\sigma T_0^3 g \gamma}{\gamma \rho_0 c_v} i (H_T k^2 + i k_z) (H k^2 - i k_z) \omega + \\ + \frac{\alpha c^2}{\gamma T_0 c_v} \frac{i k_z S k^2}{i k_z - \alpha \rho_0} \omega + g^2 (\gamma - 1) k_x^2 = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

где T_0 — температура воздуха (приповерхностный слой); σ — постоянная Стефана—Больцмана; κ — теплопроводность воздуха; $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$, k_x , k_y , k_z — соответствующие компоненты волнового вектора вдоль осей x , y , z ; $H_T = \kappa / (4\sigma T_0^3)$ — характерный вертикальный масштаб, определяемый теплопроводностью и тепловым излучением атмосферы.

Дисперсионное соотношение (19) позволяет изучать характер изменения спектра собственных колебаний атмосферы из-за ее взаимодействия с радиацией. Оно отличается от дисперсионного соотношения для равновесной атмосферы наличием второго, четвертого и пятого членов, обусловленных взаимодействием радиации с атмосферным газом. Оценки спектрального состава атмосферных волн, выполненные на основе уравнения (19), показали, что учет взаимодействия радиации с газом в определенных случаях приводит к отличию спектра собственных колебаний атмосферы, соответствующего АГВ равновесной атмосферы. Оказалось, что наблюдаемый днем спектр возмущений атмосферы сдвигается относительно ночного в высокочастотную область.

В целом, неравновесные эффекты приводят к тому, что поведение спектра волн, генерируемых СТ, определяется двумя факторами. Так, после восхода Солнца в результате диссипативных процессов спектр волн должен со временем сдвигаться в низкочастотную область. В то же время, вследствие неравновесных эффектов, спектр имеет тенденцию сдвигаться в высокочастотную область. Это приводит к компенсации скорости сдвига спектра в низкочастотную область. Но в вечерние часы тенденция диссипативного сдвига спектра в низкочастотную область совпадает с тенденцией его сдвига в низкочастотную область, обусловленную неравновесными эффектами. Поэтому скорость сдвига спектра в низкочастотную область после восхода Солнца будет меньше, чем в вечерние часы суток. Иными словами, помимо асимметрии восходной и заходной областей СТ и связанной с ней асимметрией генерируемого спектра возмущений, должна существовать асимметрия скорости изменения спектра волновых колебаний атмосферы со временем в после-восходные и послезаходные часы, обусловленная неравновесностью. Статистическая обработка данных измерений вариации давления в приземном слое атмосферы Антарктиды, а также вариации интенсивности космических лучей, подтвердила наличие сдвига спектра в высокочастотную область в освещенные периоды суток [Антонова и др., 2006; Нургалиева и др., 2007; Сомников и Нургалиева, 2007]. Невозможность объяснить наблюдаемую величину этого сдвига спектра только за счет отличия температуры атмосферы в дневные и ночные часы суток подтверждает существенную роль неравновесных эффектов в динамике атмосферы.

Отметим, что поскольку наиболее сильные изменения потока солнечной радиации в атмосфере происходят во время прохождения СТ, то и соответствующие неравновесные эффекты должны быть максимальны в эти периоды суток.

Статистический анализ вариаций геомагнитного поля также свидетельствует об увеличении сдвига его спектра в высокочастотную область при увеличении освещенности. Действительно, этот сдвиг усиливается в дневные часы и в летний сезон. Кроме того, в переходные часы суток происходит усиление амплитуд этих гармоник. Это можно связать с генерацией вариаций магнитного поля при прохождении СТ [Сомсиков и др., 2011]. Таким образом, результаты исследований неравновесных эффектов показывают, что для описания динамики атмосферы следует использовать уравнения неравновесной термодинамики с учетом солнечной радиации.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТ

Перечисление механизмов генерации возмущений в околоземном космическом пространстве при прохождении СТ говорит о многообразии и сложности протекающих в нем переходных процессов. Очевидно, что в зависимости от широты, высоты, состояния гео-гелиофизической обстановки, сезона и т.п., те или иные механизмы будут играть различную роль в генерации возмущений при прохождении СТ. Из-за отсутствия достаточно точных знаний о параметрах атмосферы, ограничений аналитических моделей СТ, точность расчетов создаваемых СТ атмосферных возмущений невелика. Это делает незаменимыми экспериментальные наблюдения возмущений, генерируемых СТ.

Первые и достаточно убедительные результаты, свидетельствующие о генерации волн в атмосфере при прохождении СТ, были получены с помощью вертикального зондирования ионосферы, методом ВНЗ, путем доплеровских и угловых измерений радиоволн [Ямпольский, 1978; Белей и др., 1983; Иванов и Терехов, 1983; Чернышева и др., 1985; Иванов и др., 1987; Овезгельдыев и др., 1987; Гоков и Гритчин, 1994; Scotto, 1994; Bianchi and Scotto, 1995]. Эти наблюдения подтвердили основные теоретические выводы о закономерностях поведения спектра генерируемых СТ волн в области ионосферы. К первым работам, также подтверждающим возникновение волнообразной структуры в области СТ, можно отнести наблюдения оптических структур с помощью измерений вариации интенсивности эмиссии 0.1630 \AA [Трунковский, 1980; Sobral et al., 1997]. Экспериментальное изучение рядов счетной концентрации аэрозольных частиц и концентрации приземного озона подтвердило наличие тропосферных АГВ, генерируемых СТ [Ивлев и Максименко, 1991]. Волновая структура озонового слоя, обнаруженная с помощью спектрофотометра-озонметра, также связана с ее генерацией СТ [Zuganova et al., 2003]. Наличие регулярной волновой структуры

атмосферы в утренние часы подтвердили измерения флуктуаций радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне [Аббасов и др., 1983; Гусейнов и др., 1985].

Начало комплексным исследованиям СТ как глобального источника атмосферных волн положили работы, выполняемые в рамках международной программы Solar Terrestrial Energy Program (STEP) [Антонова и др., 1988]. Эти исследования окончательно подтвердили, что СТ является регулярным и эффективным источником неоднородных структур различных периодов и масштабов, наблюдаемых практически во всем диапазоне высот атмосферы.

То, что СТ является источником возмущений параметров атмосферы, включая ионосферу, сделало его важным объектом исследований в области физики атмосферы и в радиофизике. При этом изучались такие характеристики, как неоднородная структура ионосферы, эффекты распространения радиоволн в переходные часы суток [Белей и др., 1983; 1991; Овезгельдыев и др., 1987; Заботин и др., 1992; Vasilyev, 1996; Galushko et al., 1998; Hooke and Schlegel, 1996; Lipko, 2001; Boška et al., 2003; Черногор, 2003; Нагорский и др., 2001; 2004; Костюкевич и др., 2004; Bakhmet'ev et al., 2005; Деминов и др., 2005; Бурмака и др., 2006; Šauli et al., 2006; Chernogor, 2008; Forbs et al., 2008], оптические явления в области СТ [Дробжев и др., 1988; Sobral et al., 1997; Sridharan et al., 2001], изменения электрических полей во время прохождения СТ [Кузнецов и Чернева, 2008]. Есть работы, в которых указывается на связь эффектов в области СТ с сейсмоактивностью [Soloviev et al., 2004; Rozhnoi et al., 2005].

Наблюдения вариаций магнитного поля также свидетельствуют о проявлении СТ в магнитном поле в различных типах пульсаций (см., например, [Saka and Alperovich, 1993]). Это, в основном, обусловлено тем, что СТ существенно влияет на токовую структуру плазмы.

Исследования квазипериодических вариаций геомагнитного поля, обусловленных магнитогидродинамическими эффектами в ионосфере и магнитосфере, наблюдаемые в утренние и вечерние часы суток в различные сезоны года, были проведены в работах [Черногор и Шамота, 2009а, б]. В результате статистического анализа магнитометрических данных ими, в частности, впервые выявлены эффекты в вариациях геомагнитного поля, которые представляют собой квазипериодический волновой процесс с наибольшими периодами ~10 мин длительностью ~50 мин.

Уже первые исследования СТ сталкивались с большими трудностями. Прежде всего, они были обусловлены глобальностью СТ. Это затрудняло создание картины глобальной волновой структуры, генерируемой СТ. Кроме того, наземные ме-

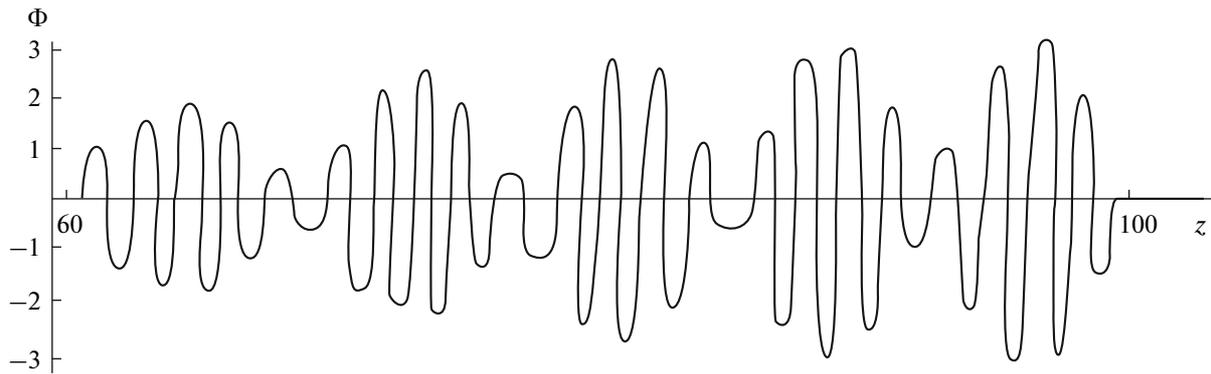


Рис. 3. Результаты численных расчетов амплитуды флуктуаций солнечного радиоизлучения при наличии атмосферной волны со скоростью 465 м/с, с горизонтальной длиной волны 100 км и вертикальной длиной волны 25 км.

годы исследований сталкивались с трудностями при изучении роли вариаций гео- гелиофизической обстановки, связанными с активностью Солнца, погодными условиями и т.п. Только появление космических методов исследований атмосферы, обладающих большой чувствительностью, дали возможность преодолеть эти трудности.

Исследования СТ с космических кораблей и спутников, начались в 80-х годах прошлого столетия. При этом изучались оптические явления в переходные часы суток, измерялись вариации электронной концентрации и электрических полей [Abramchuk et al., 1987; Аубакиров и др., 1992].

Создание системы Global Position System (GPS) на базе космических аппаратов существенно расширило возможности исследований волновых структур в области СТ. Благодаря GPS стало возможным изучение пространственно-временной картины полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы практически одновременно на всем земном шаре. С помощью статистической обработки ПЭС удалось выявить новые закономерности поведения АГВ в области СТ [Afraimovich et al., 2008; Афраймович и др., 2008]. Так, за длительный интервал времени с 1998 по 2007 гг. получена картина среднemasштабных АГВ и волновых пакетов. Установлено, что эти возмущения представляют собой узкополосные колебания ПЭС длительностью порядка 1–2 ч с периодом колебаний в диапазоне 10–20 мин, наблюдаемые после прохождения утреннего СТ. Найдено, что структура волнового фронта, перемещающегося за СТ, имеет увеличивающийся с высотой временной сдвиг относительно момента восхода Солнца на поверхности Земли. Затухание волн, определяемое их диссипацией, приводит к уменьшению возмущений при удалении от СТ. Поэтому наблюдается максимум величины возмущений, соответствующий форме пакета волн. Согласно оценкам, характерное время пакета, образованного среднemasштаб-

ными волнами, лежит в пределах от одного до нескольких часов. Именно такая картина, имеющая вид пакета, чаще всего и регистрируется с помощью GPS. С помощью GPS были также подтверждены генерации волн во время прохождения МСТ и генерация магнитогидродинамических волн при прохождении СТ [Afraimovich et al., 2009; Афраймович, 2010]. Была установлена вытянутость возмущений вдоль линии СТ. Этот результат подтверждает теоретические расчеты волн в ионосфере, согласно которым их структура имеет вид плазменных трубок, направленных вдоль СТ (см. рис. 2). С помощью GPS наблюдались и солитоноподобные волны. При значительных амплитудах возмущений такую их форму можно объяснить на основе теории солитонов [Белашов, 1990]. Не исключено также, что солитонную форму возмущений можно связать и с эффектами фазового сдвига сигнала GPS при его прохождении через возмущенный ионосферный слой. Это следует из результатов траекторных расчетов интенсивности радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне при наличии возмущений плотности атмосферы (рис. 3) [Аббасов и др., 1983; Гусейнов и др., 1985].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Начиная с 70-х годов и включая 80-е годы прошлого столетия одной из главных задач исследований СТ, являлась экспериментальная проверка теоретических расчетов генерации им волновой структуры атмосферы. Благодаря этим исследованиям удалось не только экспериментально подтвердить эти расчеты, но и доказать, что СТ является эффективным глобальным источником колебаний атмосферных параметров. Кроме того, в этот период времени удалось найти ряд новых механизмов генерации неоднородных структур атмосферы в области СТ.

Исследования СТ, проводимые в последние два десятилетия, главным образом, сводились к экспериментам по изучению пространственно-временных, сезонных, суточных особенностей генерации волн СТ для различных широт, включая высоты магнитосферы. Здесь важным являются обнаружение с помощью GPS волновых пакетов, создаваемых СТ, а также вариаций магнитного поля. Также было выявлено ряд плазменных неустойчивостей, которые ответственны за образование мелкомасштабных неоднородных структур на магнитосферных высотах.

Одновременно с экспериментальными исследованиями шло развитие теории СТ с учетом неравновесности атмосферы, обусловленной энергетической взаимосвязью между атмосферным газом и солнечной радиацией. Одним из важных результатов ее развития является установление сдвига спектров АГВ в высокочастотную область с ростом потока солнечной радиации в атмосферу. Впоследствии этот результат получил экспериментальное подтверждение. Также шло успешное развитие теории в области изучения магнитогидродинамических эффектов.

Хотя круг решенных задач в области изучения СТ достаточно широкий, он, в целом, не выходит за рамки качественных исследований создаваемых им эффектов. Пока нет достаточно точной пространственно-временной модели изменения электронной концентрации во всей области ионосферы в переходные часы суток в зависимости от сезона. Слабо изучена тонкая, турбулентная структура атмосферы, не ясны характеристики токовых структур, протекающих через СТ в области ионосферы и магнитосферы. Нет моделей, описывающих реакцию СТ на изменение солнечной активности и т.д. Без этого нельзя построить динамическую модель атмосферы, невозможно составить прогноз распространения радиоволн. Из-за слабого знания влияния эффектов в области СТ на космические аппараты, трудно исключить вероятность нештатных ситуаций, возникающих во время их пролета через переходную область атмосферы. Знание физических процессов в области СТ требуется и для понимания глобального изменения климата. Ведь именно в области СТ регулярно происходит изменение потока радиации, что делает СТ удобным для экспериментальных исследований роли изменения радиации в формировании атмосферных структур. Зная эту роль, можно понять, как вариации радиационного баланса атмосферы, обусловленные естественными и антропогенными факторами, влияют на климат.

В соответствии с потребностями науки и практики, расширением возможностей экспериментальных методов исследований околоземного пространства, в качестве основных можно выде-

лить следующие задачи дальнейших исследований СТ.

1. Развить модели СТ и построить пространственно-временную структуру вариаций электронной концентрации в области СТ на ионосферных и магнитосферных высотах с периодами от секунд и до нескольких часов в зависимости от сезона, места наблюдения, активности Солнца, состояния гео- гелиофизической обстановки.

2. Определить структурные параметры плазменных каналов, вытянутых вдоль СТ.

3. Изучить оптические свойства атмосферы в переходные часы суток.

4. Построить пространственно-временную картину радиационного баланса в области СТ.

5. Изучить эффекты МСТ в верхних слоях атмосферы.

Естественно, что по мере изучения СТ список задач будет расширяться. Их решению будут содействовать исследования характера распространения радиоволн от СДВ до СВЧ диапазонов частот в области СТ, развитие космических средств навигации и связи, изучение эффектов пролета космических аппаратов через переходную область, т.е. решение задач, которые так или иначе связаны с телекоммуникацией, освоением космического пространства, с проблемами климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аббасов А.Р., Гусейнов Ш.Ш., Сомсиков В.М. О влиянии атмосферы Земли на 3-см радиоизлучение Солнца // Астрон. циркуляр 1259. 27 мая 1983. М.: Бюро астрон. сообщества. АН СССР. С. 3–5. 1983.
- Антонова В.П., Дробжез В.И., Гусейнов Ш.Ш. и др. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 241. С. 72–117. 1988.
- Антонова В.П., Дунгенбаева К.Е., Зализовский А.В., Инчин А.С., Крюков С.В., Сомсиков В.М., Ямпольский Ю.М. Отличие спектров акустико-гравитационных волн в дневные и ночные часы, обусловленные неравновесными эффектами в атмосфере // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 1. С. 106–114. 2006.
- Архипов Ю.В., Гангули Б., Намвар Р.А., Сомсиков В.М. Влияние солнечной радиации на спектр колебаний атмосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 39. № 4. С. 108–112. 1999.
- Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат. 317 с. 1979.
- Аубакиров Т.О., Дробжез В.И., Сомсиков В.М., Таиенов Б.Т., Иванов А.И., Ляджин В.А. Эффекты в околоземном космическом пространстве, обусловленные солнечным терминатором // Докл. АН РК. № 2. С. 31–34. 1992.
- Афраймович Э.Л., Едемский И.К., Воейков С.В., Живетьев И.В., Ясюкевич Ю.В. Пространственно-временные характеристики перемещающихся ионосферных возмущений, генерируемых при движении

- солнечного терминатора / Тр. XXII Всероссийской конф. "Распространение радиоволн (РРВ-22)": Ростов-на-Дону. 22–26. 09. 2008 г. Т. 1. Иркутск: изд-во СибИЗМИР. С. 68–71. 2008.
- *Афраймович Э.Л., Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В.* МГД природа ионосферных волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором // *Геомagnetизм и аэрономия*. Т. 50. № 1. С. 82–99. 2010.
 - *Белашов В.Ю.* Динамика нелинейных внутренних гравитационных волн на высотах F -области ионосферы // *Геомagnetизм и аэрономия*. Т. 30. № 4. С. 637–641. 1990.
 - *Белей В.С., Галушко В.Г., Ямпольский Ю.М.* Восстановление параметров ПИВ в модели идеально отражающей поверхности. Харьков: РИАН УССР. Препр. 48. 11 с. 1991.
 - *Белей В.С., Галушко В.Г., Ямпольский Ю.М. и др.* Вариации вертикальных углов прихода и продольные градиенты в часы восхода солнца. М.: Наука. С. 82–83. 1983.
 - *Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. Анализ результатов наблюдений и моделирование // *Геомagnetизм и аэрономия*. Т. 46. № 2. С. 209–218. 2006.
 - *Васильев В.П., Калиниченко А.И.* Синхромеханический эффект при взаимодействии космического излучения с веществом / Проблемы ядерной физики и космических лучей. Вып. 19. С. 61–66. 1983.
 - *Васильев В.П.* Возбуждение инфразвука при радиационно-механическом синхронизме // *Кинематика и физика небесных тел*. Т. 3. № 66. С. 3–9. 1987.
 - *Васильев В.П., Шубова Р.С.* Особенности поведения критической частоты F -области ионосферы в периоды восхода Солнца. Харьков: РИАН УССР. Препр. 46. 8 с. 1990.
 - *Водяников В.В., Сомсиков В.М.* Волны, генерируемые в верхней ионосфере стационарным движущимся источником // *Изв. вузов. Радиофизика*. Т. XXV. № 8. С. 855–859. 1982.
 - *Гдалевич Г.Л., Озеров В.Д., Банков Н., Чапканов С., Тодориева Л.* Источники возмущений плазмы послекакатной низкоширотной внешней ионосферы по данным спутника Интеркосмос-Болгария 1300 // *Геомagnetизм и аэрономия*. Т. 46. № 4. С. 514–520. 2006.
 - *Гершман Б. Н.* Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука. 256 с. 1974.
 - *Гоков А.М., Гритчин А.И.* Экспериментальные исследования некоторых механизмов, описывающих природу частично отраженных сигналов // *Геомagnetизм и аэрономия*. Т. 33. № 4. С. 170–174. 1993.
 - *Гоков А.М., Гритчин А.И.* Влияние солнечного терминатора на среднеширотную D область ионосферы и характеристики частично отраженных КВ сигналов и радиошумов // *Геомagnetизм и аэрономия*. Т. 34. № 3. С. 169–172. 1994.
 - *Голицын Г.С., Мохов И.Л.* Устойчивость и экстремальные свойства модели климата // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. № 14. С. 271–277. 1978.
 - *Голян С.Ф.* О сверхдальнем распространении КВ // *Радио*. № 6. С. 14. 1980.
 - *Гусейнов Ш.Ш., Барри В., Магасугуба Н. и др.* О влиянии атмосферы Земли на условия наблюдения Солнца в радиодиапазоне / *Ионосфера*. Алма-Ата: Наука. С. 105–112. 1985.
 - *Деминов М.Г., Деминова Р.Г., Непомнящая Е.В., Ситнов Ю.С.* Зависимость вероятности появления среднеширотного F -рассеяния от солнечной активности / *Солнечно-земная физика*. Вып. 8. С. 150–151. 2005.
 - *Джалагания Т.Р., Мосашвили Н.В., Шарадзе З.С.* О реакции F -области ионосферы на прохождение ВГВ / *Волновые возмущения в ионосфере*. Алма-Ата: Наука. С. 123–128. 1980.
 - *Дробжжев В.И., Ляджин В.А., Сомсиков В.М., Ташенов Б.Т., Курмангалиев Д.А.* Лидарные исследования волновых возмущений в ионосфере, обусловленных солнечным терминатором // *Оптика атмосферы*. Т. 1. № 1. С. 105–110. 1988.
 - *Заботин Н.А., Жбанков Г.А.* Интерференционный механизм искажения поляризаций сигналов вертикального зондирования ионосферы // *Геомagnetизм и аэрономия*. Т. 32. № 1. С. 123–131. 1992.
 - *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука. 688 с. 1966.
 - *Иванов В.П., Карвецкий В.Л., Коренькова Н.А.* Сезонно-суточные вариации в параметрах среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений // *Геомagnetизм и аэрономия*. Т. 27. № 3. С. 511–516. 1987.
 - *Иванов В.Н., Терехов А.С.* Результаты исследований методом ВНЗ волновых возмущений среднеширотной ионосферы // *Изв. вузов. Радиофизика*. Т. 26. № 10. С. 1308–1310. 1983.
 - *Ивлев Л.С., Максименко И.В.* Вариации счетной концентрации аэрозольных частиц и концентрации приземного озона, вызванные терминаторной акустико-гравитационной волной // *Докл. АН СССР*. Т. 316. № 2. С. 319–321. 1991.
 - *Изаков М.Н.* Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах // *УФН*. Т. 167. № 10. С. 1087–1094. 1997.
 - *Костюкевич С.М., Нагорский П.М., Цыбиков Б.Б.* Волновые возмущения в вечернее время на суточном ходе F_oF_2 // *Геомagnetизм и аэрономия*. Т. 44. № 4. С. 476–479. 2004.
 - *Кузнецов В.В., Чернева Н.В.* Исследование форбушпонижений и эффектов терминатора в атмосферном электрическом поле на обсерватории "Паратунка" (Камчатка) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. Вып. 1. № 11. С. 89–97. 2008.
 - *Курмангалиев Д.А., Сомсиков В.М.* Структура волн поля давления атмосферы, генерируемая солнечным терминатором. Ч. 2. Расчеты. Алма-Ата: Наука. С. 19–27. 1989.
 - *Нагорский П.М., Цыбиков Б.Б.* "Возвратная" фокусировка КВ сигнала как индикатор среднемасштабных возмущений // *Геомagnetизм и аэрономия*. Т. 41. № 6. С. 841–845. 2001.

- Нурғалиева К.Е., Сомсиков В.М. Эффект смещения спектра собственных колебаний атмосферы в переходные часы суток, обусловленный неравновесностью атмосферы / Тр. XIV международного симпозиума “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы”. Ред. Банах В.А. С. 67. 2007.
- Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометиздат. 414 с. 1988.
- Овезгелдыев О.Г., Караджаев Ю., Корсунова Л.П. Влияние солнечного терминатора на слой E_s // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 27. № 6. С. 857–859. 1987.
- Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука. 552 с. 1977.
- Смирнов Б.М. Экологические проблемы атмосферы Земли // УФН. Т. 117. С. 313–322. 1975.
- Сомсиков В.М., Троицкий Б.В. Генерация возмущений в атмосфере при прохождении через нее солнечного терминатора // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 15. № 5. С. 856–860. 1975.
- Сомсиков В.М. Восходно-заходные явления в ионосфере / Ионосфера и солнечно-земные связи. Ред. Виленский И.М. Алма-Ата: Наука. С. 77–83. 1977.
- Сомсиков В.М. Электрические поля в ионосфере, обусловленные солнечным терминатором / Ионосфера и солнечно-земные связи. Ред. Виленский И.М. Алма-Ата: Наука. С. 55–60. 1980.
- Сомсиков В.М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука. 192 с. 1983.
- Сомсиков В.М. Волны, возбуждаемые в газе при его движении через границу раздела двух энергетических полупространств / Ионосфера. Алма-Ата: Наука. С. 85–92. 1985.
- Сомсиков В.М. Радиационная нелинейность // Деп. ВИНТИ № 3. В. 86. № 1370. 6 с. 1986.
- Сомсиков В.М. Переходные процессы в атмосфере земли, обусловленные солнечным терминатором. Автореферат докторской диссертации. Алма-Ата. 31 с. 1988.
- Сомсиков В.М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором. (обзор) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 31. № 1. С. 1–12. 1991.
- Сомсиков В.М. О генерации турбулентности атмосферы солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 32. № 3. С. 55–60. 1992.
- Сомсиков В.М. Гидродинамическое описание атмосферы, как открытой неравновесной системы / Проблемы эволюции открытых систем. Алматы: МОН РК. Вып. 3. С. 44–49. 2001.
- Сомсиков В.М., Дунгенбаева К.Е., Гангули Б. Акустико-гравитационные волны в неравновесной атмосфере // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 44. № 3. С. 407–411. 2004.
- Сомсиков В.М., Нурғалиева К.Е. Динамика неравновесной атмосферы / Сб. науч. тр. МОН РФ РАН МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ч. 1. Ред. Морозов А.Н. Изд-во ФИАН. С. 73–77. 2007.
- Сомсиков В.М., Андреев А.Б., Жумабаев Б.Т., Соколова О.И. Анализ суточной динамики спектра вариаций геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 1. С. 66–70. 2011.
- Трунковский Е.М. Вариации интенсивности эмиссии $01\ 6300\ \text{\AA}$ как проявление общепланетарных эффектов верхней атмосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 20. № 6. С. 1118–1120. 1980.
- Чернышева С.Н., Шефтель В.М., Шаренская Э.Г. Волновые возмущения электронной концентрации в ионосфере вблизи утреннего терминатора // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 25. № 2. С. 143–146. 1985.
- Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 8. № 1. С. 59–106. 2003.
- Черногор Л.Ф., Шамота М.А. Геомагнитные пульсации вблизи г. Харькова, сопутствовавшие прохождению солнечного терминатора. 1. Результаты статистического анализа // Космічна наука і технологія. Т. 15. № 5. С. 43–51. 2009а.
- Черногор Л.Ф., Шамота М.А. Геомагнитные пульсации вблизи г. Харькова, сопутствовавшие прохождению солнечного терминатора. 2. Результаты статистического анализа // Космічна наука і технологія. Т. 15. № 6. С. 14–19. 2009б.
- Ямпольский Ю.М. Исследования вариаций СДВ вблизи интерференционного минимума и терминатора // Автореферат канд. дис. Ленинград: ЛГУ. 32 с. 1978.
- Abramchuk V.P., Oraevsky D.N., Ruzhin V.V. Sporadic E layer in the twilight period during winter and its relation to sunrise in conjugate area // Acta Geod. Geophys. V. 22. № 1. P. 199–209. 1987.
- Altadill D., Solé J.G., Apostolov E.M. Vertical structure of a gravity wave like oscillation in the ionosphere generated by the solar eclipse of August 11. 1999 // J. Geophys. Res. V. 106. № A10. P. 214–219. 2001.
- Afrimovich E.L. First GPS-TEC evidence for the wave structure excited by the solar terminator // LETTER Earth Planets Space. № 60. P. 895–900. 2008.
- Afrimovich E.L., Edemskiy I.K., Leonovich A.S., Leonovich L.A., Voeykov S.V., Yasyukevich Y.V. MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator // Geophys. Res. Lett. V. 36. № L15106. P. 1–5. 2009.
- Bakhmet'ev N.V., Belikov V.V., Kagan L.M., Ponyatov A.A. Sunset-sunrise characteristics of sporadic layers of ionization in the lower ionosphere observed by the method of resonance scattering of radio waves from artificial periodic inhomogeneities of the ionospheric plasma // Radiophysics and quantum electronics. V. 48. № 1. P. 15–28. 2005.
- Beer T. Supersonic generation of atmospheric waves // Nature. V. 242. № 5392. P. 34–35. 1973.
- Beer T. On atmospheric wave generation by the terminator // Planet. Space Sci. V. 26. P. 185–188. 1978.
- Bianchi C., Scotto C. Focusing-defocusing phenomena of radio echo signal after passage of morning solar terminator // Il Nuovo Cimento. V. 18. № 1. P. 81–82. 1995.
- Boška J., Šauli P., Altadill D., German Sjlje J., Alberca L.F. Diurnal variation of the gravity wave activity at midlatitudes in the ionospheric F region // Stud. Geophys. Geod. V. 47. P. 569–576. 2003.

- *Chau J., Hysell D.L.* High altitude large-scale plasma waves in the equatorial electrojet at twilight // *Ann. Geophysicae*. V. 22. P. 401–407. 2004.
- *Chernogor L.F.* Advanced Methods of Spectral Analysis of Quasiperiodic Wave-Like Processes in the Ionosphere: Specific Features and Experimental Results // *Geomagn. Aeron.* V. 48. № 5. P. 652–673. 2008.
- *Cot C., Teitelbaum H.* Generated of the gravity waves by inhomogeneous heating of the atmosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 42. № 9/10. P. 877–883. 1980.
- *Crombie D.D.* Periodic fading of VLF signals received over long path at sunrise and sunset // *Radio Sci. J. Res. NBS 680*. № 1. P. 27–34. 1964.
- *Ermakova E.N., Belyaev P.P., Belova N.I., Trakhtengerts V.Yu.* A sunset effect in variations of the eigenfrequencies of the ionospheric Alfvén resonator // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 62. № 4. P. 249–252. 2000.
- *Essex C.* Radiation and the Irreversible Thermodynamics of Climate // *J. Atmos. Sci.* V. 41. № 12. P. 1986–1991. 1984.
- *Forbes J.M., Bruinsma S.L., Miyoshi Y., Fujiwara H.* A solar terminator wave in thermosphere neutral densities measured by the CHAMP satellite // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. № L 14802. P. 1–4. 2008.
- *Galushko V.G., Paznukhov V.V.* Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator // *Ann. Geophysicae*. V. 16. P. 821–827. 1998.
- *Gavrilov N.M.* Parameterization of momentum and energy depositions from gravity waves generated by tropospheric hydrodynamic sources // *Ann. Geophysicae*. V. 15. P. 1570–1580. 1997.
- *Gel'berg M.G., Volkov N.N., Kukushkina R.S.* Effect of weak large-scale inhomogeneity the auroral ionosphere on the propagation radio waves in the shortwave range // *Radiophys. Quantum El.* V. 21. № 11/H. P. 1106–1112. 1978.
- *Hooke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and traveling ionosphere disturbances: 1982–1995 // *Ann. Geophysicae*. V. 14. № 9. P. 917–940. 1996.
- *Hu S., Bhattacharjee A.* Gradient-drift instabilities and turbulence in the nighttime equatorial electrojet // *J. Geophys. Res.* V. 104. № 28. P. 123–127. 1999.
- *Leonovich A.S., Kozlov L.A., Pilipenko V.F.* Magnetosonic Resonance in a Dipole-Like Magnetosphere // *Ann. Geophysicae*. V. 24(8). P. 2277–2289. 2006.
- *Lipko Yu.V.* Inhomogeneous structure of the high-latitude ionosphere as observed at Norilsk // *arXiv:physics/0107031v2-17Jul 2001*.
- *Ronchi C., Sudan R.N., Farley D.T.* Numerical simulations of large-scale plasma turbulence in the daytime equatorial electrojet // *J. Geophys. Res.* V. 96. № 21. P. 263–270. 1991.
- *Rozhnoi A.A., Solovieva M.S., Molchanov O.A., Hayakawa M., Maekawa S., Biagi P.F.* Anomalies of LF signal during seismic activity in November–December 2004 // *Nat. Hazard. Earth Sys.* № 5. P. 657–660. 2005.
- *Ruzhin Y.Ya., Kim V.Yu., Panchenko V.A. et al.* The Doppler observations of the night sporadic E-layer during the sunrise passage at the magnetic conjugated atmosphere // *Geophys. Res. Abstracts*. V. 11. EGU2009. P. 4637. 2009 EGU General Assembly. 2009.
- *Šauli P., Abry P., Altadill D., Boška J.* Detection of the wave-like structures in the F-region electron density two station measurements // *Stud. Geophys. Geod.* V. 50. P. 131–146. 2006.
- *Saka O., Alperovich L.* Sunrise effect on dayside Pc pulsation at the dip equator // *J. Geophys. Res.* V. 98. № A8. P. 13779–13786. 1993.
- *Scotto C., Bianchi C., Zolesi B.* Oscillations of F2 layer at downtime / *Conf. Publication HF Radio systems and Techniques*. 4–7 July 1994. № 392. P. 60. 1994.
- *Sekar R., Raghavaro R.* Role of vertical winds on the Rayleigh-Taylor mode instability of the night-time equatorial ionosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 49. № 10. P. 981–986. 1987.
- *Sobral J.H.A., Borba G.L., Abdu M.A., et al.* Post-sunset wintertime 630.0 nm airglow perturbations associated with gravity waves at low latitudes in the South American sector // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 59. № 13. P. 1611–1623. 1997.
- *Soloviev O.V., Hayakawa M., Ivanov V.I., Molchanov O.A.* Seismo-electromagnetic phenomenon in the atmosphere in terms of 3D subionospheric radio wave // *Phys. Chem. Earth*. V. 29. № 4–9. P. 639–647. 2004.
- *Somsikov V.M.* A spherical model of wave generation in atmosphere by solar terminator // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 49. № 5. P. 433–438. 1987.
- *Somsikov V.M.* On mechanisms of formation of atmospheric inhomogeneities in the solar terminator region // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 57. № 1. P. 75–83. 1995.
- *Sridharan R., Chakrabarty D., Narayanan R. et al.* Coordinated thermospheric day–night airglow and ionospheric measurements from low latitudes—First results // *Geophys. Res. Lett.* V. 28. № 7. P. 1387–1390. 2001.
- *Sudha R., Krishna M.B.V.* Occurrence of type I plasma in the equatorial electrojet during morning and evening hours // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A5. P. 9761–9765. 1997.
- *Tadahiko O., Eiichi S., Yuichi O., Kazuo S., Thomas I.I., Stephen B.M., Wilkinson P.* Simultaneous ground- and satellite-based airglow observations of geomagnetic conjugate plasma bubbles in the equatorial anomaly // *Earth Planets Space*. № 57. P. 385–392. 2005.
- *Tobias B.* Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/ Kyrgyzstan) using remote sensing data // *Global and Planetary Change*. V. 61. P. 231–238. 2008.
- *Vasilyev V.P.* Latitude location of the source of the ionospheric short-term disturbances // *Geomagn. Aeron.* V. 35. № 4. P. 589. 1996.
- *Zyryanova O.A., Somsikov V.M.* Investigation of a Structure of Ozone Variation Spectrum in the Region of Acoustic Gravity Waves on Data of the Almaty Spectrophotometer-Ozonometer // *Geomagn. Aeron.* V. 43. № 5. P. 234–240. 2003.