

Р.А. Кононов, А.В. Тащилин

Влияние сезонных и циклических вариаций термосферных параметров на ночную интенсивность красной линии атомарного кислорода

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 17.09.2001 г.

Согласно данным наблюдений ночной ход интегральной светимости верхней атмосферы в красной линии 630 нм на средних широтах имеет ряд характерных особенностей, таких как усиление свечения вблизи полуночи и в предсумеречные периоды. Появление этих особенностей и их свойства зависят от сезона, уровня солнечной и геомагнитной активности.

С целью исследования механизмов генерации наблюдаемых вариаций эмиссии красной линии выполнены расчеты изменения этих величин на основе модели ионосферно-плазматического взаимодействия для различных геофизических условий (зима, весна, лето, осень, $F_{10.7} = 70, 130, 200$). Модель учитывает азотно-кислородный цикл химических реакций, который является основным выше 100 км, и включает согласованное описание ионного состава ($O^+, N^+, H^+, He^+, O_2^+, NO^+, N_2^+$), температур электронов и ионов, потоков фотоэлектронов и горизонтального нейтрального ветра. Анализ результатов расчетов позволил количественно оценить вклад изменений нейтрального состава, скорости ветра, условий освещенности в процесс формирования наблюдаемых ночных эмиссий атомарного кислорода в линии 630 нм.

Введение

Красное свечение на длине волны $\lambda = 630$ нм является одним из основных типов эмиссий ночной среднеширотной термосферы. Излучение соответствует запрещенному переходу ($^1D \rightarrow ^3P_2$) атомарного кислорода и формируется выше 120 км, т.е. на высотах F -области ионосферы. Интенсивность свечения красной линии кислорода является индикатором ионосферно-термосферного взаимодействия, а ее вариации однозначно связаны как с концентрацией и температурой как электронов в районе F_2 -слоя ионосферы, так и с концентрациями нейтральных составляющих верхней атмосферы. В настоящее время накоплен значительный объем данных наблюдений за эмиссией 630 нм в широком диапазоне гелиогеофизических условий, включающих спокойные и геомагнитно-возмущенные периоды [1, 2].

В геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в пос. Торы последние несколько лет проводятся наблюдения и регистрация собственного ночного свечения земной атмосферы, в частности излучения в красной линии атомарного кислорода в средних широтах.

В данной статье представлены некоторые результаты наблюдений красной эмиссии в геомагнитно-спокойных условиях и проведение интерпретации этих данных на основе разработанной модели среднеширотной ионосферы.

Результаты наблюдений

Вариации эмиссии $\lambda = 630$ нм характеризуются регулярным ночным ходом. Ночью интенсивность красной эмиссии сосредоточена в ионосферной F -области с максимумом интенсивности на высотах около 250–270 км. Интенсивность эмиссии 630 нм во все сезоны уменьшается от 200–300 до 30–50 рэлей (Рл) около полуночи. До 22–23 ч местного времени уменьшение происходит достаточно быстро, затем замедляется и после полуночи мало изменяется до того времени, когда начинаются местные сумерки

(для весны, лета, осени), либо до момента предсумеречного усиления, связанного с началом сумерек в магнитно-сопряженной ионосфере (для зимы) [1].

Типичные временные изменения интенсивности свечения в линии 630 нм для спокойных геофизических условий, наблюдаемые в ночное время, показаны на рис. 1.

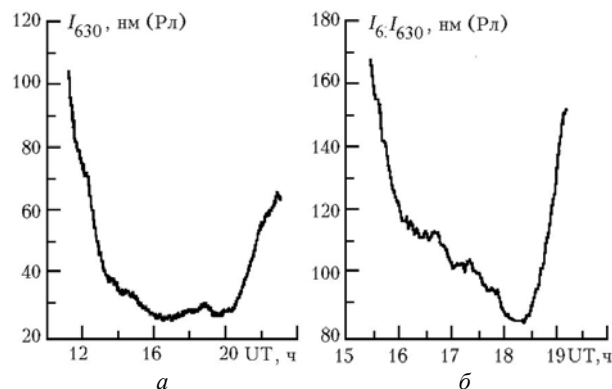


Рис. 1. Типичный ночной ход эмиссии 630 нм для зимы 10.01.2000 (а) и лета 7.06.2000 (б)

Видно, что для зимнего периода (рис. 1, а) после 22 ч местного времени (14 ч UT) характерны следующие особенности поведения интенсивности эмиссии 630 нм: продолжительный, порядка 4–5 ч, мало меняющийся этап ночного хода, после которого в 3,5–4,5 ч начинается усиление интенсивности свечения, переходящее в небольшую «ступеньку» (наибольшая длительность которой приходится на период зимнего солнцестояния) и далее, с началом местного восхода, начинается усиленный рост интенсивности свечения. Для летнего периода (рис. 1, б) характерны уменьшение ночного хода до 3 ч (минимум приходится на период летнего солнцестояния) и возрастание интенсивности излучения в сравнении с зимним периодом.

Весенний и осенний ночные хода являются промежуточными между летним и зимним. Кроме того, ночной ход эмиссии 630 нм в пункте наблюдения часто искажается нерегулярными вариациями, которые связаны с локальными возмущениями в ночной атмосфере и неблагоприятными метеоусловиями.

Интерпретация наблюдений

Интенсивность интегрального свечения (в рэлях) в линии 630 нм определяется выражением

$$I_{630} = 10^{-6} \cdot A_{630} \int_0^{\infty} [O(^1D)] dh, \quad (1)$$

где $A_{630} = 0,0071 \text{ с}^{-1}$ – коэффициент Эйнштейна; $[O(^1D)]$ – концентрация возбужденных атомов кислорода в состоянии 1D на высоте h , величина которой определяется из условия баланса между скоростями накачки и опустошения метастабильного уровня 1D .

Согласно современным представлениям [3, 4] основными процессами возбуждения уровня 1D атомов кислорода являются следующие:

– диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов O_2^+ :



– столкновения с тепловыми электронами:



– столкновения со сверхтепловыми электронами (фотоэлектронами):



Деактивация атомов $O(^1D)$ происходит в результате спонтанного излучения (вероятность A_{630}) и путем гашения при столкновениях с тепловыми электронами и нейтральными молекулами N_2 и O_2 . Из условия баланса процессов возбуждения и деактивации получаем концентрацию $[O(^1D)]$ (см^{-3}) в виде

$$[O(^1D)] = \frac{\gamma_1 \xi_1 [O_2^+] N_e + \gamma_2 [O(^3P)] [e_t] + \gamma_3 [O(^3P)] [e_f]}{A_{630} + \gamma_4 [O_2] + \gamma_5 [N_2] + \gamma_6 [O] + \gamma_7 N_e}, \quad (5)$$

где ξ_i – коэффициент ветвления реакции (2); $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – константы скоростей реакций (2)–(4) соответственно, $\gamma_4, \gamma_5, \gamma_6, \gamma_7$ – константы скоростей реакций гашения при соударениях с O_2, N_2, O и электронами соответственно.

Расчет $[O(^1D)]$ по формуле (5) требует знания электронной концентрации N_e и температуры T_e , от которой зависит константа γ_1 , а также концентрация фотоэлектронов $[e_f]$. Для определения высотных профилей этих величин была использована разработанная в ИСЗФ СО РАН теоретическая модель системы «ионосфера–плазмосфера».

Модель основана на численном решении нестационарных уравнений баланса частиц и энергии тепловой плазмы в замкнутых геомагнитных силовых трубках с основаниями на высоте 100 км. Полагалось, что плазма состоит из атомарных O^+, H^+, N^+, He^+ и молекулярных ионов

N_2^+, O_2^+, NO^+ . Концентрации всех ионов, кроме N_2^+ , рассчитывались с учетом процессов фотоионизации, рекомбинации и диффузии вдоль геомагнитных силовых линий. Температуры электронов и ионов вычислялись с учетом процессов теплопроводности и обмена энергией между электронами, ионами и нейтралами в результате упругих и неупругих столкновений. Скорость нагрева тепловых электронов фотоэлектронами рассчитывалась согласованно, путем решения кинетического уравнения переноса фотоэлектронов в сопряженных ионосферах, с учетом потери энергии при прохождении через плазмосферу [5].

Для описания пространственно-временных вариаций температуры верхней атмосферы, концентраций нейтральных компонентов O, O_2, N_2, H и N применялась глобальная эмпирическая модель термосферы MSIS-86 [6], а скорости горизонтального термосферного ветра определялись по модели HWM-90 [7]. Спектр УФ-излучения EUVAK [8] был использован при расчете скоростей фотоионизации термосферных составляющих и энергетических спектров первичных фотоэлектронов. Более детальная информация о модели и методе численного решения приведена в [5].

С целью исследования механизмов формирования ночных изменений интенсивности красной линии были выполнены модельные расчеты интегральной светимости (1) для точки с географическими координатами: 52° с.ш. и 105° в.д., для четырех сезонов (весна, лето, осень, зима) и трех уровней солнечной активности ($F_{10,7} = 70, 130, 200$). Результаты расчетов представлены на рис. 2.

На рис. 2, а, в, д показаны ночные хода I_{630} для трех сезонов (данные для осени идентичны весенним и поэтому не приведены) при высоком, среднем и низком уровнях солнечной активности. На рис. 2, б, г, е представлены ночные хода интегральной интенсивности для умеренной активности ($F_{10,7} = 130$) и трех указанных сезонов, соответствующие механизмам возбуждения уровня 1D в результате диссоциативной рекомбинации O_2^+ , а также при столкновениях с фотоэлектронами и тепловыми электронами.

Из рис. 2, а, в, д следует, что ночной ход I_{630} имеет существенные сезонные различия, тогда как с ростом солнечной активности происходит равномерное увеличение светимости во все моменты времени. В неосвещенное время основным механизмом возбуждения является диссоциативная рекомбинация, причем соответствующая интенсивность свечения изменяется пропорционально изменениям N_e и $[O_2^+]$ (концентрация O_2^+ экспоненциально затухает после захода Солнца). Весной и летом в сумеречные периоды около восхода и захода Солнца становится существенным вклад возбуждения фотоэлектронами. Этот эффект зависит от сезона, так как его действие ограничено моментами восхода и захода. Именно увеличение неосвещенного периода при переходе от лета к равноденственным сезонам обуславливает более широкий «провал» в ночном ходе I_{630} весной по сравнению с летом (см. рис. 2, а, в). Возбуждение тепловыми электронами не играет заметной роли весной и летом.

Зимний ночной ход интенсивности I_{630} имеет качественную особенность в предвосходный период, которая выражается в усилении свечения примерно за 3 ч до местного восхода Солнца. Как следует из рис. 2, е, этот эффект также связан с фотоэлектронным механизмом возбуждения. Он является прямым следствием связи между сопряженными ионосферами и объясняется приходом в неосвещенную зимнюю ионосферу сверхтепловых электронов из сопряженной летней ионосферы.

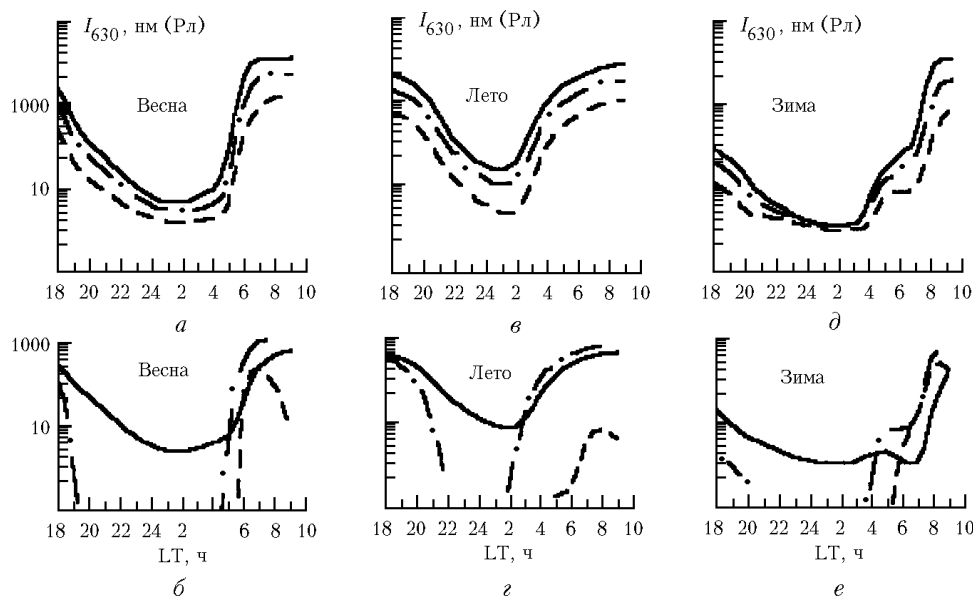


Рис. 2. Ночной ход эмиссии 630 нм для указанных сезонов и трех уровней солнечной активности: а, в, д – $F_{10.7} = 200$ (сплошная линия), $F_{10.7} = 130$ (штрихпунктирная), $F_{10.7} = 70$ (штриховая); б, г, е – диссоциативная рекомбинация (сплошная линия), фотоэлектроны (штрихпунктирная), тепловые электроны (штриховая)

Таким образом, исследование механизмов образования ночной эмиссии на длине волны 630 нм показало следующее:

1) в ночном ходе интегральной светимости 630 нм сезонные вариации выражены более значительно, чем в цикле солнечной активности;

2) основными механизмами генерации свечения в красной линии атомарного кислорода являются диссоциативная рекомбинация O_2^+ и столкновительное возбуждение уровня 1D фотоэлектронами;

3) постоянной чертой ночного хода I_{630} в зимнее время является превосходное усиление свечения, обусловленное фотоэлектронами, приходящими из сопряженной летней ионосферы.

1. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 272 с.
2. Hays P.B., Rusch D.W., Roble R.G. and Walker J.G.G. The OI (6300 Å) airglow /Rev. Geophys. 1978. V. 16. № 2. P. 225–232.

3. Solomon S.C., Hays P.B., Abreu V.J. The auroral 6300 Å emission: observations and modeling / J. Geophys. Res. A. 1988. V. 93. N. 9. P. 9867–9882.
4. Burrage M.D., Fesen C.G., Abreu V.J. Low-latitude thermospheric neutral winds determined from AE-E measurements of the 6300-Å nightglow at solar maximum / J. Geophys. Res. A. 1990. V. 95. N. 7. P. 10357–10364.
5. Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 192 с.
6. Hedin A.E. MSIS-86 thermospheric model / J. Geophys. Res. A. 1987. V. 92. N. 5. P. 4649–4662.
7. Hedin A.E., Biondi M.A., Burnside R.G., Johnson R.M., Killen T.L., Mazaudier C., Meriwether J.W., Salah J.E., Sica R.J., Smith R.W., Spencer N.W., Wickwar V.B., and Viridi T.S. Revised global model of thermosphere winds using satellite and ground-based observations / J. Geophys. Res. A. 1991. V. 96. N. 5. P. 7657–7688.
8. Richards P.G., Fennelly J.A. and Torr D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations / J. Geophys. Res. A. 1994. V. 99. N. 5. P. 8981–8992.

R.A. Kononov, A.V. Tashchilin. Influence of the seasonal and solar activity variations of thermospheric parameters upon the night-time intensity of the atomic oxygen red line.

According to observed data, night-time variation of the upper atmosphere red (630 nm) line integral intensity has a few typical particularities, among which are midnight and twilight enhancements of the red line emission. The appearance and features of these particularities depend on the season and on the level of solar and geomagnetic activity. To study the processes which form the observed enhancements, the calculations of the night-time variation of the red line emission are carried out for different geophysical conditions (winter, spring, summer, and $F_{10.7} = 70, 130, 200$). With this in mind the numerical model of the ionosphere-plasmasphere coupling was used. This model takes into account the nitric-oxygen cycle of chemical reactions and photoelectron heating and makes it possible to calculate the height density distributions of the H^+ , He^+ , N^+ , O^+ , NO^+ , N_2^+ , O_2^+ ions, of exited $O(^1D)$ oxygen atoms, of electron and ion temperatures, as well as of charged particle and heat fluxes above 100 km. An analysis of the modeling results has allowed us to evaluate the individual contributions of the neutral composition variations and of the impact excitation of oxygen atoms by the thermal electrons and photoelectrons to the observed night-time emissions of atomic oxygen in 630 nm line.