

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 550.338

Модельная оценка интенсивности эмиссии ОI 630 нм во время сильной геомагнитной бури 20 ноября 2003 г.

А.В. Тащилин, Л.А. Леонович*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291*

Поступила в редакцию 13.11.2017 г.

На основе данных высыпания энергичных электронов, полученных при помощи техники инверсии магнитограмм, выполнены модельные оценки вариаций параметров ночной среднеширотной ионосферы для Иркутска (52° с.ш., 105° в.д.) во время очень сильной геомагнитной бури 20–23 ноября 2003 г. ($K_p = 9$, $D_{st_{max}} = 472$ нТл). Полученные потоки выпадающих электронов способны создавать концентрации электронов в ночной ионосфере с величинами $n_e \sim 3 \cdot 10^6$ см⁻³ и температурой электронов $T_e \leq 4500$ К, что может обеспечить наблюдаемые величины увеличения эмиссии красной линии за счет возбуждения уровня ¹D атомарного кислорода главным образом при столкновениях молекулярных ионов кислорода с тепловыми электронами.

Ключевые слова: ионосферное возмущение, свечение верхней атмосферы, геомагнитные бури; ionospheric disturbance, airglow, geomagnetic storm.

Введение

Экстремальная геомагнитная буря с минимальным значением $D_{st} = -472$ нТл и максимальным $K_p = 9$ произошла 20–23 ноября 2003 г. в результате мощного выброса солнечной корональной массы 18 ноября. Параметры солнечного ветра и околоземного космического пространства, по данным сайта OMNIWeb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>), а также интенсивности свечения верхней атмосферы, измеренные в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.) во время этой супербури, представлены на рис. 1. Пиковое значение южной компоненты межпланетного магнитного поля $B_z = -47$ нТл; максимальные интенсивности эмиссий атомарного кислорода с длиной волны 630 и 557,7 нм достигли ~19,4 и ~11,1 кРл соответственно [1].

Сильные геомагнитные бури обычно сопровождаются значительными смещениями в сторону низких широт экваториальных границ аврорального овала [2], магнитосферной конвекции [3] и зоны высыпаний энергичных магнитосферных электронов [4, 5]. В работе [6] было показано, что во время бури 20 ноября 2003 г. экваториальная граница зоны магнитосферной конвекции в ионосфере смещалась до геомагнитных широт ~30–35°. При высоком уровне геомагнитной активности происходит сильный нагрев атмосферы на авроральных широтах. Образующиеся при этом волны возмущения распространяются в термосфере к низким широтам, существенно изменяя температуру, относительный

состав термосферы и параметры нейтрального ветра. Например, во время магнитной бури 20 ноября 2003 г. спутником CHAMP [7] было зарегистрировано возрастание общей плотности термосферы на высоте 400 км до 800% по сравнению со спокойным периодом. Такие возмущения имели место как в околополуденном, так и в околополуночном секторах на средних широтах.

В настоящей работе делается попытка оценить интенсивность эмиссии атомарного кислорода с длиной волны 630 нм в ночной среднеширотной ионосфере в условиях магнитной бури 20 ноября 2003 г., используя численную модель ионосферы.

1. Модельные оценки вариаций интенсивности свечения атомарного кислорода в линии 630 нм

1.1. Описание модели

Рассматриваемая геомагнитная буря началась в 08:00 UT 20 ноября 2003 г. На рис. 1, *г* и *д* приведены вариации интенсивности ночного свечения атомарного кислорода в линиях 557,7 (зеленая линия) и 630 нм (красная линия) в ходе этой бури [1].

Исследуем возможность генерации эмиссии в красной линии в результате действия только двух факторов — пучка выпадающих из магнитосферы энергичных электронов и возрастания плотности нейтральной атмосферы во время магнитной бури.

Для оценки значений интенсивности излучения с длиной волны 630 нм, достигаемых под действием указанных факторов, нами была принята следующая модель ночной среднеширотной ионосферы в интер-

* Анатолий Васильевич Тащилин (avt@iszf.irk.ru); Людмила Анатольевна Леонович (lal@iszf.irk.ru).

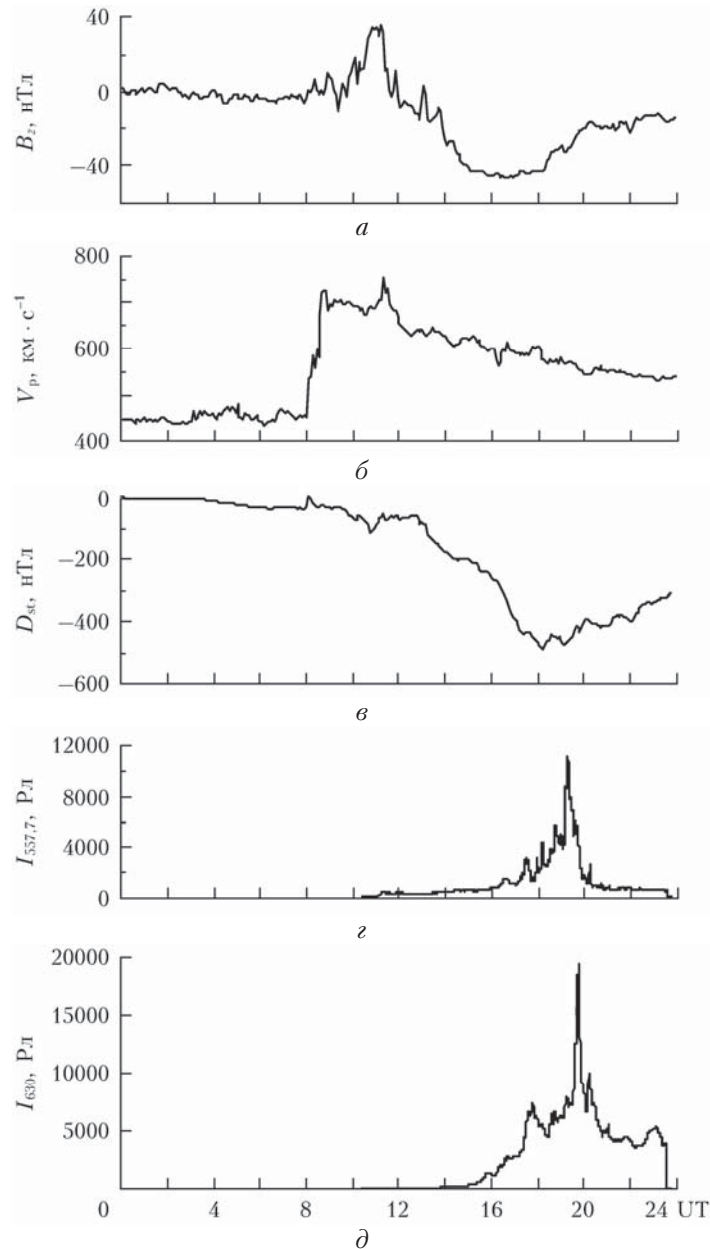


Рис. 1. Временные вариации параметров окружающего космического пространства и верхней атмосферы во время супербури 20 ноября 2003 г.: B_z компоненты межпланетного магнитного поля (а); скорости солнечного ветра V_p (б); индекса геомагнитной активности D_{st} (в); интенсивности эмиссии атомарного кислорода 557,7 (г) и 630 нм (д)

вале высот 90–700 км [8]. Полагаем, что в ночных условиях, когда фотоионизация отсутствует, источниками заряженных частиц выступают приток ионов O^+ из плазмосферы P_* через верхнюю границу $h_* = 700$ км и ударная (корпускулярная) ионизация термосферы, состоящей из N_2 , O_2 , O , N , NO , высыпавшимися из магнитосферы энергичными электронами. Будем считать, что на верхней границе h_* входящий пучок магнитосферных электронов изотропен по питч-углам и имеет максвелловское распределение по энергии вида

$$I(E) = \frac{4P_e}{E_{av}^3} E \exp\left(-\frac{2E}{E_{av}}\right), \text{ электрон} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1}, \quad (1)$$

где E — энергия; P_e — интегральный поток энергии в пучке; E_{av} — средняя энергия высыпавшихся электронов.

При прохождении пучка электронов через нейтральную атмосферу их первоначальное распределение по энергиям и углам (1) изменяется в результате упругих и неупругих столкновений, приводящих к потере энергии первичными высыпавшимися электронами и к образованию новых энергичных электронов. Такой измененный спектр в области энергий $E \geq 2$ эВ будем называть спектром сверхтепловых электронов (СТЭ). СТЭ с достаточно большими энергиями ($E > 10$ эВ) ионизуют нейтральные частицы, создавая первичные ионы N_2^+ , O_2^+ , O^+ , N^+ , тогда

как СТЭ с энергиями $E < 10$ эВ приводят к образованию возбужденных атомов и молекул. В результате потеря энергии основное содержание электронов сосредоточено в низкоэнергичной части спектра. Такие электроны с энергиями $E \leq 2$ эВ будем называть тепловыми. В этой части спектра происходит наиболее эффективная передача энергии от СТЭ к тепловым электронам за счет кулоновских столкновений, т.е. осуществляется нагрев ионосферной плазмы [9].

Под действием описанных источников в ионосфере возможно установление стационарных распределений по высоте ионного состава, электронной и ионной температур, энергетических спектров СТЭ и атомов кислорода в возбужденных метастабильных состояниях $O(^1D)$ и $O(^1S)$, которые являются источниками кислородных эмиссий в красной и зеленой линиях соответственно. Более детальное описание модели ночной ионосферы приведено в работе [8].

1.2. Расчет интенсивности красной линии

Излучение на длине волны 630 нм происходит при переходе атома кислорода из состояния 1D в основное состояние 3P . Объемная светимость красной линии определяется соотношением

$$\eta_{630} = A_{630} [O(^1D)] = A_{630} \sum_{k=1}^3 [O(^1D)_k], \text{ фотон} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1},$$

где $A_{630} = 0,00563 \text{ с}^{-1}$ — коэффициент Эйнштейна (вероятность высвечивания уровня 1D); $[O(^1D)]$ — концентрация возбужденных атомов кислорода в состоянии 1D на высоте h , величина которой определяется из условия баланса между скоростями возбуждения и деактивации метастабильного уровня 1D . Для ночных среднеширотных условий можно считать, что атомы кислорода в состоянии 1D образуются в результате действия трех процессов [8]:

— столкновения с тепловыми электронами:

$$[O(^1D)] = 0,596 \frac{9329 + T_e}{(51813 + T_e)^3} \sqrt{T_e} \exp\left(-\frac{22756}{T_e}\right) \frac{[O]n_e}{L_{630}},$$

— диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов O_2^+ :

$$[O(^1D)] = f(^1D)\alpha_d \frac{[O_2^+]n_e}{L_{630}},$$

— столкновения атомов O со сверхтепловыми электронами:

$$[O(^1D)] = 4\pi \frac{[O]}{L_{630}} \int_{E_{1D}}^{\infty} I_O^{(^1D)}(E) \Phi_0(E) dE.$$

Здесь $\Phi_0(E)$ — изотропная часть потока СТЭ [9]; $f(^1D) = 1,2$ — эффективность образования возбуж-

денных атомов $O(^1D)$ в реакции диссоциативной рекомбинации ионов O_2^+ (квантовый выход); α_d — коэффициент реакции диссоциативной рекомбинации; $I_O^{(^1D)}$ — дифференциальное сечение возбуждения уровня 1D электронным ударом; $E_{1D} = 1,96$ эВ — энергия возбуждения уровня 1D ; L_{630} — вероятность деактивации уровня 1D в результате спонтанного высвечивания и гашения при столкновениях с нейтралами N_2 , O_2 , O и электронами, определяемая соотношением [10]:

$$L_{630} = A_{1D} + 10^{-11} \left(0,16 T_e^{0,91} n_e + 0,8 [O] + 2,9 \exp\left(\frac{68}{T_n}\right) [O_2] + 2,0 \exp\left(\frac{108}{T_n}\right) [N_2] \right), \text{ с}^{-1},$$

где $A_{1D} = 0,00745 \text{ с}^{-1}$.

Интегральная интенсивность свечения красной линии (в рэлях) определяется выражением

$$I_{630} = 10^{-6} \cdot A_{630} \int_{h_0}^{h_*} [O(^1D)] dh = I_{630}^{\text{th}} + I_{630}^{\text{diss}} + I_{630}^{\text{el}}$$

(I^{th} , I^{diss} , I^{el} — интегральные интенсивности свечения, обусловленные столкновениями с тепловыми электронами, диссоциативной рекомбинацией ионов O_2^+ и столкновениями с СТЭ соответственно).

2. Обсуждение результатов моделирования

Моделирование отклика ночной среднеширотной атмосферы на высыпания энергичных электронов были выполнены для географического пункта с координатами (52° с.ш., 104° в.д.) и соответствовали следующим геофизическим условиям: 324-й день года (20 ноября 2003 г.); индексы солнечной активности $F_{10,7} = 171$, $\bar{F}_{10,7} = 135$; суммарный за сутки индекс геомагнитной активности $\Sigma K_p = 50,3$, среднесуточное значение индекса $\bar{A}_p = 150$.

Пространственно-временные вариации температуры и концентраций нейтральных компонентов N_2 , O_2 , O , N , NO задавались при помощи глобальной эмпирической модели термосферы NRLMSISE-00 [11]. На верхней границе $h_* = 700$ км определялся входящий из плазмосферы поток ионов кислорода $P_* = -2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; потоки остальных ионов полагались равными нулю. Тепловой баланс электронов и ионов рассчитывался при условии отсутствия потоков тепла на верхней границе. Изотропная часть потока СТЭ $\Phi_0(E)$ находилась путем численного решения уравнения переноса СТЭ в термосфере в интервале энергий от $E_{\text{min}} = 1$ эВ до $E_{\text{max}} = 10^4$ эВ при заданном на верхней границе спектре высыпавшихся электронов (1). При этом вариации средней энергии пучка высыпавшихся электронов E_{av} и интегрального потока энергии P_e , входящие в выражение (1), были получены для рассматриваемого

периода 20 ноября 2003 г. с использованием техники инверсии магнитограмм (ТИМ). Метод ТИМ, разработанный в ИСЗФ СО РАН [12, 13], обеспечивает расчет 2D карт распределений эквивалентных токов, электрического потенциала, горизонтальных и продольных токов и нагрева Джоуля в высокоширотной ионосфере на основе геомагнитных данных мировой сети магнитометров. В комплекс ТИМ также входит определение границ аврорального овала и расчет параметров энергетического спектра высыпавшихся авроральных электронов. Временные вариации полученных значений E_{av} и P_e приведены на рис. 2, а, б.

Вначале расчеты интегральных интенсивностей красной линии были выполнены с использованием параметров нейтральной атмосферы, вычисленных на основе модели термосферы NRLMSISE-00 с входными данными, соответствующими геофизическим условиям 20 ноября 2003 г. (рис. 2, в). Результаты оказались примерно на два порядка меньше измеренных наблюдений. Чтобы устранить такое сильное различие между данными расчетов и наблюдений, была проведена оценка плотности нейтральной атмосферы, необходимой для согласования расчетов и наблюдений интенсивности эмиссии красной линии. С этой целью при тех же вариациях параметров

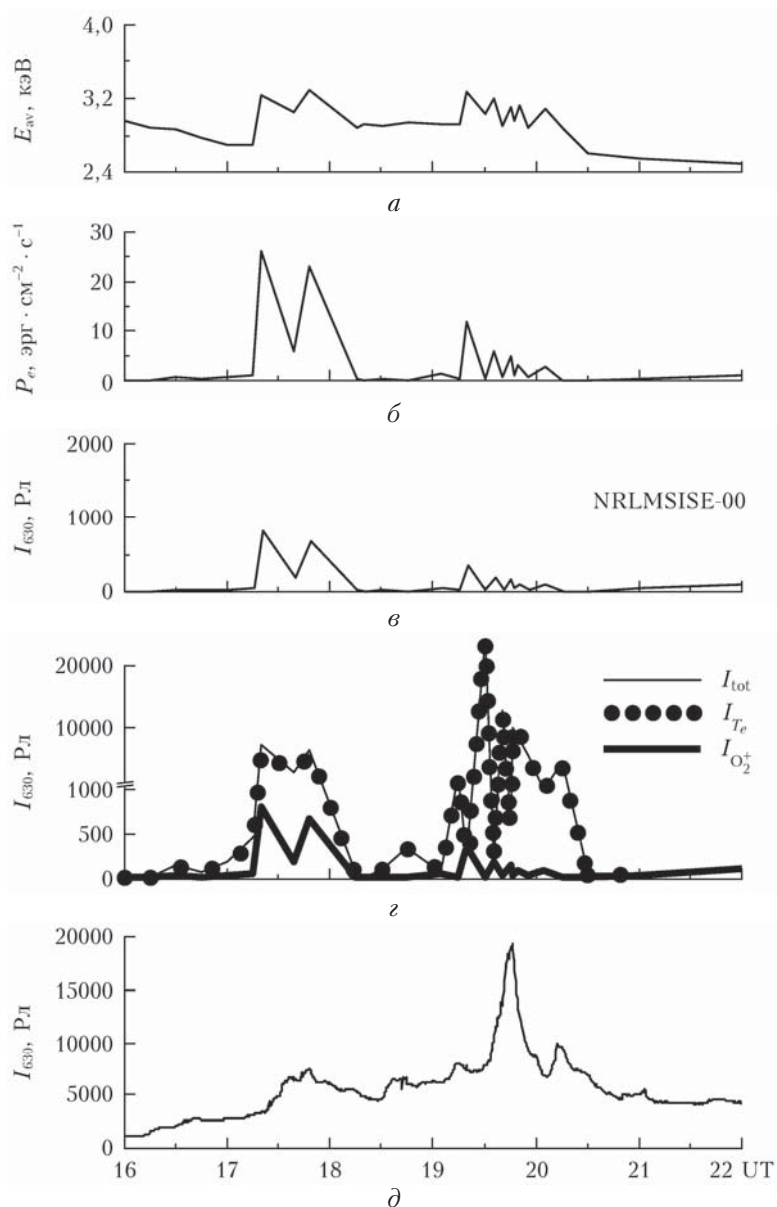


Рис. 2. Рассчитанные средние E_{av} (а) и интегральные P_e (б) энергии вторгающихся СТЭ; интегральная интенсивность свечения линии 630 нм, рассчитанная по NRLMSISE-00 без коррекции плотности (в) и с коррекцией плотности (г); интегральная интенсивность свечения I_{tot} и ее составляющие, обусловленные столкновениями атомов кислорода с тепловыми электронами I_{Te} и диссоциативной рекомбинацией молекулярных ионов $I_{O_2^+}$; измеренное значение интегральной интенсивности свечения в линии 630 нм (д)

высыпающихся электронов производилась коррекция концентраций нейтральных частиц, полученных по модели NRLMSISE-00, путем их увеличения. Значения интенсивности эмиссии красной линии, близкие к измеренным, были получены при увеличении концентрации нейтральных частиц в 8 раз. Как отмечалось выше, такое возмущение нейтральной атмосферы не противоречит данным измерений со спутника CHAMP [7].

Зависимости интегральной интенсивности эмиссии 630 нм от различных факторов демонстрируют рис. 2, *в, г*. Их сравнение показывает, что высыпания электронов в слабо возмущенной термосфере (модель NRLMSISE-00) не способны обеспечить наблюдаемые интегральные интенсивности красной линии, тогда как учет возмущения термосферы путем увеличения ее плотности в 8 раз дает удовлетворительные результаты. При этом, как следует из рис. 2, *г*, основной вклад в эмиссию 630 нм вносит процесс возбуждения уровня 1D атомов кислорода при их столкновениях с тепловыми электронами. Отметим, что рассчитанные изменения интегральной интенсивности красной линии качественно и количественно согласуются с вариациями, измеренными в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН во время магнитной бури 20 ноября 2003 г. (см. рис. 2, *д*).

На рис. 3 показаны высотные распределения объемной эмиссии 630 нм (V_{630}), концентрации и температуры электронов в ночной среднеширотной ионосфере, рассчитанные при скорректированных концентрациях нейтральных составляющих термосферы для двух моментов времени: 17:33 UT, когда поток энергии высыпающихся электронов, согласно данным ТИМ (см. рис. 2, *б*), имел максимальное значение $P_e = 26 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а $E_{av} = 3,23 \text{ кэВ}$, и 16:00 UT, когда поток энергии был незначительным ($P_e = 0,25 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), а $E_{av} = 2,96 \text{ кэВ}$. Видно, что пучок высыпающихся электронов с очень большой интегральной энергией может создать в ночное время ионосферную область с концентрацией электронов $N_e \geq 10^6 \text{ см}^{-3}$ и температурой $T_e \geq 5000 \text{ К}$. Максимум этого слоя располагается в районе 350–400 км. Причина образования тепловой плазмы с такими характеристиками заключается в следующем.

Максвелловская форма энергетического спектра высыпающихся электронов (1) в случае очень больших значений интегрального потока энергии P_e и относительно небольших средних энергий $E_{av} \approx 2-4 \text{ кэВ}$ приводит к тому, что в низкоэнергетической части спектра $E < 100 \text{ эВ}$ оказывается достаточно много СТЭ, которые эффективно теряют свою энергию на высотах $h \geq 300 \text{ км}$ в результате ударной ионизации термосферных составляющих и кулоновских столкновений с тепловыми электронами, нагревая последние [8]. Высокие концентрации и температуры электронов обеспечивают, в свою очередь, усиление объемной и интегральной светимостей в линии 630 нм.

Заметим, что в используемой нами модели не учитывался дополнительный приток тепла в электронном газе через верхнюю границу ионосферы,

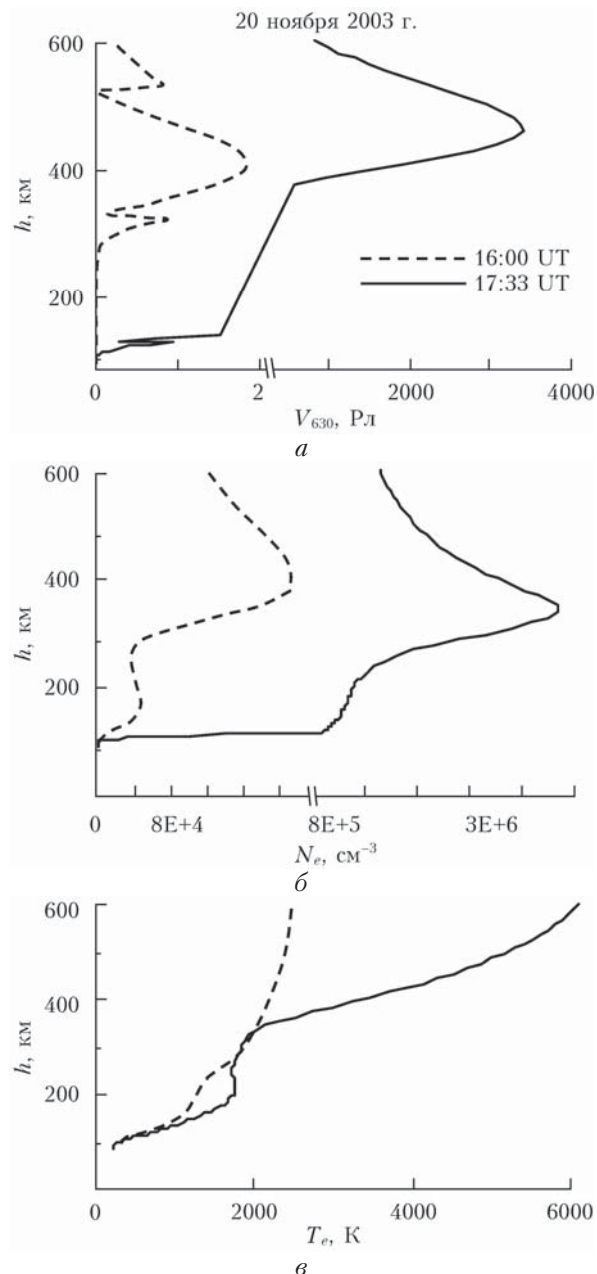


Рис. 3. Высотные профили объемной эмиссии атомарного кислорода в линии 630 нм (*а*), концентрации (*б*) и температуры (*в*) электронов, рассчитанные для времени 17:33 UT (сплошная линия), когда потоки энергии высыпающихся электронов были максимальны, и 16:00 UT (штриховая линия), когда эти потоки были малы

который может создаваться в приэкваториальных частях плазмосферы во время магнитной бури в результате диссипации энергии кольцевого тока при его взаимодействии с плотной низкоэнергетичной плазмой плазмосферы. В настоящее время действие этого механизма считается основной причиной образования SAR-дуг и, возможно, среднеширотных сияний [14]. Для определения вклада этого механизма в наблюдаемые вариации эмиссии 630 нм во время сильных магнитных бурь требуются дальнейшие исследования.

Заклучение

В данной работе на основе физико-математической модели получена оценка изменений интенсивности свечения красной линии атомарного кислорода с длиной волны 630 нм в ночной среднеширотной ионосфере во время сильной магнитной бури 20 ноября 2003 г. и проведено сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН.

При проведении модельных расчетов учитывалось действие только двух факторов, контролирующих интенсивность красной линии: высыпания энергичных магнитосферных электронов и возмущение плотности термосферы. Вариации параметров высыпающихся электронов в ходе рассматриваемой магнитной бури определялись с использованием техники инверсии магнитограмм, а возмущенные значения концентраций термосферных составляющих были получены путем коррекции соответствующих значений из модели NRLMSISE-00 по данным измерений спутника CHAMP.

Результаты моделирования качественно и количественно согласуются с данными наблюдений. Общай высокий фон кислородной эмиссии 630 нм обусловлен наблюдаемым возрастанием плотности нейтральной атмосферы в несколько раз (до 8 раз) во время рассматриваемой магнитной бури. Отдельные пиковые усиления интенсивности красной линии на этом фоне связаны главным образом с вариациями интегрального потока энергии высыпающихся магнитосферных электронов. Установлено, что пучок высыпающихся электронов с интегральной энергией $26 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и средней энергией $\sim 3 \text{ кэВ}$ может создавать в ночное время ионосферную область с концентрацией электронов $N_e \geq 10^6 \text{ см}^{-3}$ и температурой $T_e \approx 4500\text{--}5000 \text{ К}$. При этом показано, что основной вклад в усиление эмиссии 630 нм вносит процесс возбуждения уровня 1D атомов кислорода при их столкновениях с тепловыми электронами, нагретыми до такой высокой температуры.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-05-00563). Мы благодарим А.В. Михалева за подготовку данных оптических измерений и полезные обсуждения в ходе подготовки статьи. Вариации характеристик высыпающихся электронов были подготовлены С.Б. Лунюшкиным, А.Б. Кондратьевым и Ю.А. Караваевым на основе метода ТИМ в рамках проекта № 01201281656 «Изучение динамических процессов в системе нейтральная атмосфера—ионосфера—магнитосфера Земли», за что мы им также выражаем благодарность. В работе использовались экспериментальные данные, полученные

на основе оптического оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» ИСЗФ СО РАН.

1. Михалев А.В., Белецкий А.Б., Косылева Н.В., Черниговская М.А. Среднеширотные сияния на юге Восточной Сибири во время больших геомагнитных бурь 29–31 октября и 20–21 ноября 2003 г. // Космические исследования. 2004. Т. 42, № 6. С. 616–621.
2. Meng C.-I. Dynamic variation of the auroral oval during intense magnetic storms // J. Geophys. Res. A. 1984. V. 89, N 1. P. 227–235. DOI: 10.1029/JA089iA01p00227.
3. Foster J.C., Vo H.B. Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream // J. Geophys. Res. A. 2002. V. 107, N 12. P. 1475. DOI: 10.1029/2002JA009409.
4. Gussenhoven M.S., Hardy D.A., Heinemann N.I. Systematics of the equatorward diffuse auroral boundary // J. Geophys. Res. A. 1983. V. 88, N 7. P. 5692–5708. DOI: 10.1029/JA088iA07p05692.
5. Newell P.T., Liou K., Zhang Y., Sotirelis T., Paxton L.J., Mitchell E.J. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // Space Weather. 2014. V. 12, N 6. P. 368–379. DOI: 10.1002/2014sw001056.
6. Pokhotelov D., Mitchell C.N., Spencer P.S.J., Hairston M.R., Heelis R.A. Ionospheric storm time dynamics as seen by GPS tomography and *in situ* spacecraft observations // J. Geophys. Res. A. 2008. V. 113, N 3. P. A00A16. DOI: 10.1029/2008ja013109.
7. Liu H., Lühr H. Strong disturbance of the upper thermospheric density due to magnetic storms: CHAMP observations // J. Geophys. Res. A. 2005. V. 110. P. A09S29. DOI: 10.1029/2004JA010908.
8. Тащилин А.В., Леонович Л.А. Моделирование ночных свечений красной и зеленой линий атомарного кислорода для умеренно возмущенных геомагнитных условий на средних широтах // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 76–84.
9. Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмаосфера. М.: Наука, 1984. 188 с.
10. Mantas G.P. Large 6300-E airglow intensity enhancements observed in Ionosphere Heating Experiments are excited by thermal electrons // J. Geophys. Res.: Space Phys. A. 1994. V. 99, N 5. P. 8993–9002.
11. 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. A. 2002. V. 107, N 12. P. 1468. DOI: 10.1029/2002JA009430.
12. Базаржапов А.Д., Матвеев М.И., Мишин В.М. Геомагнитные вариации и бури. Новосибирск: Наука, 1979. 248 с.
13. Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications // Space Sci. Rev. 1990. V. 53, N 1–2. P. 83–163. DOI: 10.1007/bf00217429.
14. Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. 2th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 628 p.

A.V. Tashchilin, L.A. Leonovich. Model estimation of the OI 630 nm emission intensity during the strong geomagnetic storm on November 20, 2003.

Based on the energetic electron precipitation data, obtained using the magnetogram inversion technique (MIT), there were performed model estimates of variations in the night mid-latitude ionosphere parameters for Irkutsk (52°N, 105°E) during the very strong geomagnetic storm on November 20–23, 2003 ($K_p = 9$, $D_{st_{max}} = 472 \text{ nT}$). The derived fluxes of precipitating electrons are able to produce the night electron density with $n_e \sim 3 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ and electron temperature $T_e \leq 4500 \text{ K}$, which can provide the observed magnitude increase in the red line emission due to excitation of atomic oxygen 1D level, mainly in collisions of molecular oxygen ions with thermal electrons.