

Вариации среднеширотных атмосферных эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм, связанные с геомагнитной активностью

Л.А. Леонович, А.В. Михалев, В.А. Леонович*

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

Поступила в редакцию 28.09.2010 г.

Исследуется отклик среднеширотного свечения верхней атмосферы на слабые и умеренные геомагнитные бури. Для анализа используются экспериментальные данные наблюдений свечения атмосферных эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм, полученные в регионе Восточной Сибири (52° с.ш., 103° в.д.) за период 1997–2009 гг. Было отмечено, что в некоторые периоды геомагнитных бурь наблюдались одновременные возмущения вариаций рассматриваемых эмиссий. Обсуждаются особенности наблюдаемых возмущений эмиссий, их связь с магнитосферно-ионосферными структурами и предполагаемые источники.

Ключевые слова: эмиссии атомарного кислорода, свечение верхней атмосферы, геомагнитные бури; atomic oxygen airglow, mid-latitude airglow, geomagnetic storm.

Введение

Вариации интенсивности эмиссий мезосферы – нижней термосферы дают важную информацию о процессах в верхней атмосфере средних широт во время геомагнитных возмущений (ГВ). Считается, что эмиссии F -области ионосферы более чувствительны к геомагнитным возмущениям, эмиссия атомарного кислорода O_{630} является наиболее интенсивной из них [1, 2]. Эмиссия атомарного кислорода $O_{557,7}$ является одной из наиболее ярких дискретных линий в свечении среднеширотной атмосферы. Задача о проявлении геомагнитных возмущений в вариациях интенсивности этой эмиссии в средних широтах имеет давнюю историю [3–5] и остается до конца не решенной [2, 6]. Это связано с тем, что вариации интенсивности рассматриваемой эмиссии, обусловленные другими источниками, затрудняют выделение отклика этой эмиссии на ГВ. Также до сих пор до конца не ясны механизмы возмущения эмиссии 557,7 нм на средних широтах во время геомагнитных бурь. В настоящей статье дан совместный анализ вариации в эмиссиях атомарного кислорода 557,7 и 630 нм во время слабых и умеренных геомагнитных возмущений.

Аппаратура и методика измерений

Были использованы данные наблюдений эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм, полученные в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН

* Людмила Анатольевна Леонович (lal@iszf.irk.ru); Александр Васильевич Михалев (mikhalev@iszf.irk.ru); Виталий Анатольевич Леонович (leonkgb@mail.ru).

(52° с.ш., 103° в.д.), за период 1997–2009 гг. Оптические измерения проводились с помощью зенитного фотометра «Феникс», рабочие длины волн 557,7 и 630 нм и спектральные интервалы 360–410 и 720–810 нм. Эмиссионные линии 557,7 и 630 нм выделялись интерференционными качающимися светофильтрами ($\Delta\lambda_{1/2} \sim 1-2$ нм), спектральные диапазоны 360–410 и 720–830 нм – абсорбционными светофильтрами. Угловые поля зрения каналов фотометра составляли 4–5°. Абсолютная калибровка измерительных трактов аппаратуры осуществлялась в отдельные периоды по эталонным звездам и впоследствии контролировалась с помощью опорных световых источников.

Результаты наблюдений

Короткопериодические вариации интенсивности эмиссии 630 нм (I_{630}) во время довольно сильных геомагнитных возмущений, резко нарушающих регулярный ночной ход, наблюдаются достаточно часто и относительно хорошо исследованы [1, 2, 8].

Возмущение вариации I_{630} в большинстве случаев связывают с распространением внутренних гравитационных волн (ВГВ). Так, в работе [8] описаны наблюдения на двух среднеширотных станциях аномального ночного хода интенсивности эмиссии 630 нм. Из 124 ночей в 53 наблюдался аномальный ночной ход интенсивности 1–2 максимума в 23:00–3:00 ч местного времени с амплитудой более 100 Рл. В основном максимумы интенсивности эмиссии 630 нм появлялись в периоды магнитных бурь с запаздыванием по отношению к максимумам K_p и АЕ на несколько часов. Авторы [8] предположили, что

аномальные максимумы интенсивности на кривой ночного хода интенсивности эмиссии, так же как и перемещающиеся ионосферные неоднородности в F -области, связаны с крупномасштабными внутренними гравитационными волнами, генерируемыми большими магнитосферными суббурями в полярной области. Отмечается также, что максимумы возмущения эмиссии 630 нм совпадают с минимумами на кривой ночного хода $h'F$.

В обзоре [9] сообщается, что результаты исследований зависимости интенсивности эмиссии 557,7 нм и ее вариаций от геомагнитной активности в средних широтах имеют противоречивый характер. В одних работах была найдена положительная корреляция между интенсивностью эмиссии $I_{557,7}$ и геомагнитной активностью, в других была обнаружена отрицательная корреляция; есть работы, в которых отмечено отсутствие корреляции между этими событиями, и наконец, есть работы, где был найден некоторый порог уровня геомагнитной активности, выше которого выявлялась положительная корреляция.

Аналогичная ситуация сохраняется и в более поздних работах. В частности, в работе [5] при исследовании зависимости колебаний интенсивности эмиссии 557,7 нм от геомагнитной активности по материалам Международного геофизического года (МГГ) на двух среднеширотных станциях получено, что среднеквадратические величины амплитуд колебаний зависят от геомагнитной активности и уменьшаются с ее ростом. В работе [4] анализировались данные по вариациям свечения верхней атмосферы во время геомагнитных возмущений, полученные в периоды МГГ и Международного года спокойного Солнца (МГСС). Оказалось, что для отдельных среднеширотных станций средние ночные интенсивности эмиссии 557,7 нм имеют тенденцию к возрастанию с увеличением средней геомагнитной активности. При этом для других станций такая тенденция отсутствует. Автор [4] объяснил полученные результаты большой дисперсией интенсивности эмиссии 557,7 нм и возможными большими пространственными вариациями эмиссии 557,7 нм. И наконец, есть работы последних лет, в которых описаны возмущения в эмиссии 557,7 нм во время геомагнитных бурь и обсуждаются возможные их механизмы [6, 10–12]. Нами было проведено аналогичное исследование по данным наблюдений за свечением эмиссии 557,7 нм в регионе Восточной Сибири (52° с.ш., 103° в.д.) за период 1997–2009 гг.

На рис. 1 приведена зависимость изменчивости интенсивности эмиссии 557,7 нм в течение ночи от уровня геомагнитной активности (для слабых и умеренных геомагнитных возмущений).

В качестве изменчивости интенсивности эмиссии 557,7 нм используется коэффициент вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм, определяемый как отношение среднеквадратического отклонения измерений интенсивности эмиссии 557,7 нм в течение ночи к средней за ночь интенсивности эмиссии 557,7 нм (среднее значение $\sim 0,2$, стандартное отклонение $\sim 0,073$). В качестве индекса геомагнитной активно-

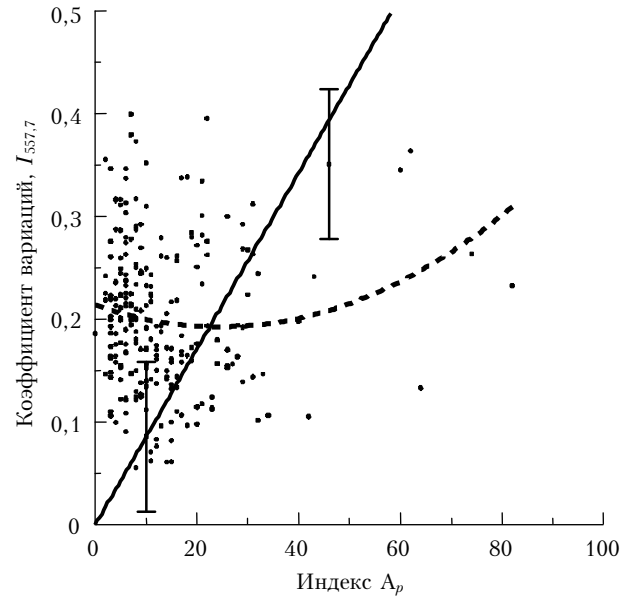


Рис. 1. Зависимость коэффициента вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм от уровня геомагнитной активности (для слабой и умеренной геомагнитной активности за период 1997–2009 гг.)

сти используется суточное значение индекса A_p . Точками обозначены экспериментальные данные, и приведены две регрессионные кривые: простая регрессионная зависимость $Y = aX$ (сплошная линия) и полином 2-й степени (штриховая). Приведены значения стандартного отклонения для коэффициента вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм.

Выбор линии регрессии типа $Y = aX$, в отличие от регрессионной линии $Y = aX + b$, может быть обоснован тем, что сопоставляются не абсолютные величины, а их изменения или вариации. Для интенсивности эмиссии 557,7 нм — это коэффициент вариаций, а для геомагнитной активности — индекс A_p , который определяется в единицах магнитного поля (наноТеслах) и представляет собой среднее значение вариации магнитного поля. В этом случае дифференцирование уравнения типа $Y = aX + b$ приводит к используемой регрессионной зависимости типа $\Delta Y = a\Delta X$, где в качестве ΔY рассматривается коэффициент вариации интенсивности эмиссии 557,7 нм, а в качестве ΔX — индекс A_p .

Анализ данных, приведенных на рис. 1, позволяет отметить достаточно сильную дисперсию коэффициента вариации интенсивности эмиссии 557,7 нм. Тем не менее линия регрессии типа $Y = aX$ позволяет предположить существование зависимости вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм от уровня геомагнитной активности. Что касается использования других регрессионных линий (моделей), включая полином 2-й степени и особенно регрессионную зависимость типа $Y = aX + b$, то они не позволяют сделать однозначного вывода о существовании зависимости вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм от уровня геомагнитной активности вследствие высокой дисперсии коэффициента вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм.

Тем не менее представляет интерес сопоставление особенностей поведения регрессионной линии полинома 2-й степени с результатами работ предшествующих лет. В частности, в уже отмеченной выше работе [5] получено, что среднеквадратические величины амплитуд колебаний интенсивности эмиссии 557,7 нм зависят от геомагнитной активности и уменьшаются с ее ростом. Такую тенденцию можно увидеть на кривой полинома 2-й степени в диапазоне $A_p \sim 0-30$. В работе [3] сообщается об обратной корреляции между интенсивностью эмиссии 557,7 нм в диапазоне геомагнитных возмущений по индексу $K_p \sim 0-7$ и прямой корреляции при индексах $K_p \sim 8-9$. Полином 2-й степени, приведенный на рис. 1, качественно указывает на возможность такой зависимости.

Вероятно, существование достаточно сильной дисперсии в вариациях интенсивности эмиссии 557,7 нм, обусловленной источниками другой природы, и использование разных регрессионных моделей и различных выборок данных наблюдений, относящихся к различным широтно-долготным зонам, и приводят к различным выводам о характере зависимости вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм от уровня геомагнитной активности.

Для изучения зависимости вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм от уровня геомагнитной активности нами были рассмотрены конкретные геомагнитные бури с различными уровнями геомагнитных возмущений.

Магнитная буря 8 июня 2000 г.

Умеренная буря с максимальным значением $K_p = 7$ и минимальным значением $D_{st} = -90$ нТл продолжалась с 08 июня (SC) 09:10 UT по 09 июня 16 UT. На рис. 2, а приведены вариации эмиссий 630 и 557,7 нм во время геомагнитной бури на основе данных Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН.

Рис. 2, б иллюстрирует те же самые вариации с удаленным трендом. Для эмиссии 630 нм достаточно хорошо выделяются квазипериодические колебания с периодом $\sim 1,5$ ч. Колебания с аналогичным периодом можно выделить и в эмиссии 557,7 нм, если ее аппроксимировать полиномом (рис. 2, б). Также следует отметить некоторый фазовый сдвиг между колебаниями красной и зеленой эмиссий. Зеленая эмиссия опережает красную примерно на 20 мин.

Магнитная буря 14–16 декабря 2006 г.

Сильная магнитная буря с максимальным значением $K_p = 8+$ и минимальным значением $D_{st} = -147$ нТл продолжалась с 14 декабря (SC) 14:15 UT по 15 декабря 17 UT.

Во время этой бури 15 декабря необычная перестройка вертикальной структуры ночной ионосферы наблюдалась на ионосферной станции Иркутск. На

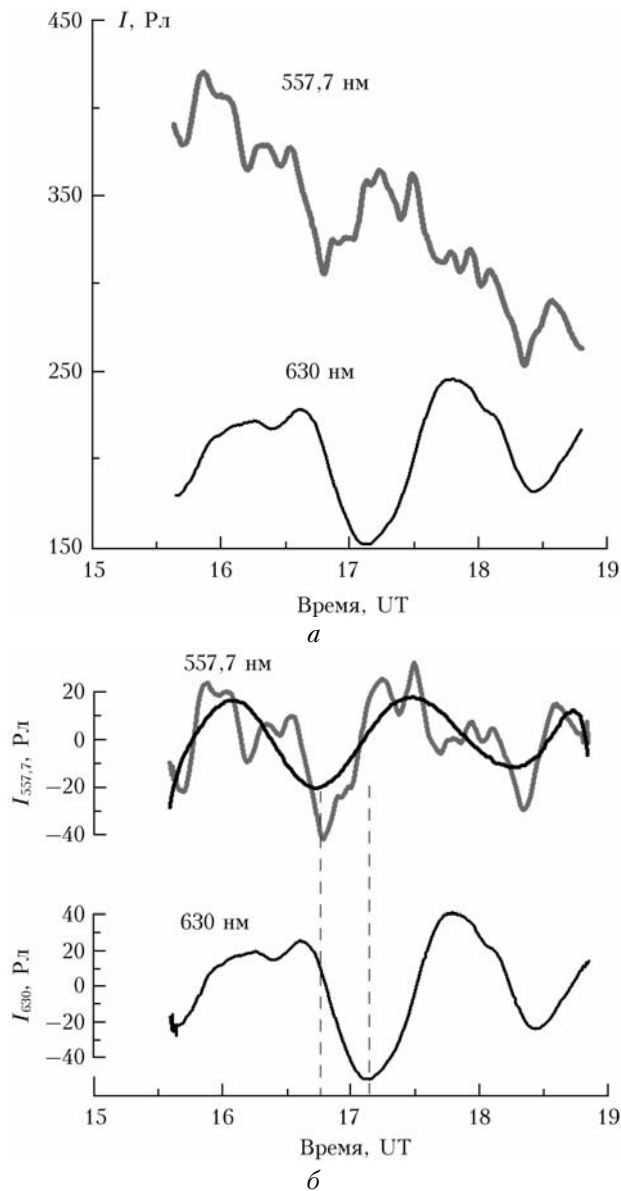


Рис. 2. Вариации эмиссий 630 и 557,7 нм во время геомагнитной бури 8 июня 2000 г.

ионограммах в ночные часы наблюдались сильные вариации высоты максимума слоя $h_m F_2$ (рис 3, б), а также значительное повышение критической частоты $f_0 F_2$ (рис 3, а). Величина Δh составила около 100 км. Штриховыми линиями показаны средние характеристики для спокойного дня 09.12.2006.

Как следует из рис. 3, а, в 11:00 UT критическая частота $f_0 F_2$ уменьшилась в соответствии с суточным ходом. При этом высота максимума слоя F_2 также уменьшилась (рис. 3, б). В течение 1,5 ч (с 10:25 до 12:00) она понизилась на 90 км. Именно в это время (на фазе падения высоты) одновременно наблюдался синфазный рост интенсивностей красной (630 нм) и зеленой (557,7 нм) эмиссий.

Следующий одновременный всплеск интенсивностей красной и зеленой эмиссий наблюдался примерно с 14 до 16 UT. Он также происходил на фазе падения высоты $h_m F_2$, с 13:40 до 15:35 UT она по-

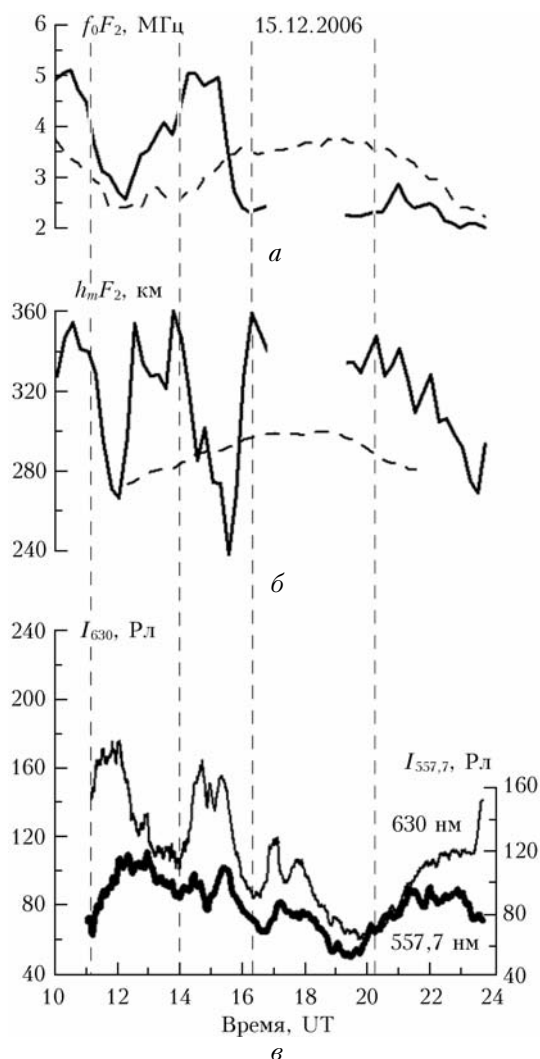


Рис. 3. Вариации критической частоты f_0F_2 , высоты максимума слоя h_mF_2 , а также эмиссий 630 и 557,7 нм во время геомагнитной бури 15 декабря 2006 г.

низилась примерно на 130 км. Далее одновременные всплески интенсивностей этих эмиссий наблюдались после 16:00 и после 20:00 UT. После 20:00 UT это явление происходило также на фазе уменьшения высоты h_mF_2 . Поведение высоты h_mF_2 после 16:00 точно описать невозможно из-за того, что в это время область F_2 на ионограмме была заэкранирована нижележащим спорадическим слоем E_s , хотя тенденция к ее уменьшению просматривается.

Магнитная буря 15–20 января 2007 г.

Слабая магнитная буря с максимальным значением $K_p = 5$ и минимальным значением $D_{st} = -30$ нТл продолжалась с 15 января 08 UT по 17 января 24 UT. Для 16 января 2007 г. приведены интенсивности эмиссий 557,7 и 630 нм с удаленным трендом (рис. 4, в), вариации критической частоты f_0F_2 (рис. 4, а) и высоты максимума слоя h_mF_2 (рис. 4, б). В рассматриваемый (ночной) период времени на ионограммах отмечались диффузные

отражения от области F_2 и небольшое поглощение в области D . Высота максимума слоя F_2 с 16:00 до 19:50 UT уменьшилась (рис. 4, б) примерно на 80 км. По аналогии с предыдущим событием на фазе падения высоты наблюдался рост интенсивности зеленой и красной эмиссий.

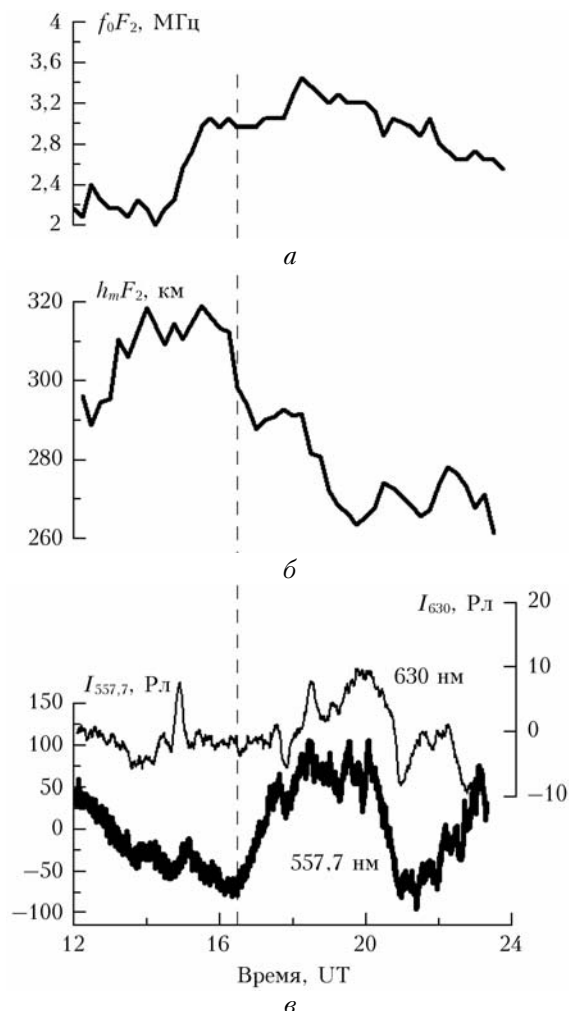


Рис. 4. Вариации критической частоты f_0F_2 , высоты максимума слоя h_mF_2 , а также эмиссий 630 и 557,7 нм во время геомагнитной бури 16 января 2007 г.

Общей характерной особенностью поведения вариаций эмиссий 557,7 и 630 нм в период рассматриваемых магнитных бурь является увеличение их интенсивностей на фазе понижения высоты максимума ионосферного слоя h_mF_2 . Эта особенность для эмиссии 630 нм была отмечена достаточно давно [13] и связывается с процессом возбуждения эмиссии 630 нм в результате диссоциативной рекомбинации, которая естественным образом приводит к заключению о связи параметров излучения с характеристиками ионосферной области F_2 — высотой ее максимума h_mF_2 и критической частотой f_0F_2 , определяющей электронную концентрацию. Полученное в [13] приближенное количественное выражение связи I_{630} с параметрами ионосферы используется до настоящего времени [2]:

$$I_{630} = K'(f_0 F_2)^2 [\text{O}_2]_{200} \exp\left(-\frac{h_m F_2 - 200}{H}\right), \quad (1)$$

где K' – эмпирический коэффициент; $[\text{O}_2]_{200}$ – концентрация молекулярного кислорода на высоте 200 км; H – высота однородной атмосферы в излучающей области.

Между тем в средних широтах процесс диссоциативной рекомбинации при возбуждении эмиссии 557,7 нм во время геомагнитных возмущений также может иметь место и использоваться для интерпретации вариаций эмиссии 557,7 нм, что было отмечено в [6]. Это связано с тем, что небольшая часть от общей интенсивности эмиссии 557,7 нм, которая формируется в основном на высотах в области E в результате столкновений нейтральных компонентов атмосферы, возбуждается в области F в результате процесса диссоциативной рекомбинации с участием заряженной компоненты.

Коррелированные вариации интенсивности эмиссий 557,7 и 630 нм в средних широтах во время геомагнитных возмущений отмечались и ранее. Так, в работе [7] проводился совместный анализ вариаций интенсивностей эмиссии 557,7 и 630 нм в средних широтах. Из 290 ночей наблюдений в большинстве случаев (~75%) интенсивности эмиссий 557,7 и 630 нм менялись независимо в соответствии с их механизмами возбуждения в слое E и F соответственно, в 25% случаев отмечалось синхронное затухание интенсивности обеих эмиссий в течение 2–3 ч после захода Солнца. И лишь в течение четырех ночей наблюдались совпадающие по фазе и амплитуде колебания интенсивности эмиссий 557,7 и 630 нм, которые длились 6–8 ч и имели периоды от ~70 до 330 мин. В эти ночи наблюдалась повышенная геомагнитная активность. Сравнение с ионосферными данными показало, что аналогичные колебания имели место для высоты $E_s(h'E_s)$ и $F(h'F)$, причем максимумам интенсивности эмиссий 557,7 и 630 нм соответствовали минимумы $h'E_s$ и $h'F$. Авторы предположили, что такие вариации являются результатом одновременного подъема и опускания слоев E_s и F .

При этом основная сложность в интерпретации вариаций эмиссий 557,7 и 630 нм заключается в их количественных соотношениях. В настоящее время считается, что в спокойных геомагнитных условиях интенсивность эмиссии 557,7 нм в слое F_2 составляет около 10–30% от интенсивности эмиссии 630 нм (см., например, [2, 14]). Это обусловлено различными коэффициентами квантового выхода возбужденных метастабильных состояний 1D и 1S в реакции диссоциативной рекомбинации. В анализируемых в настоящей статье геомагнитных бурях отношение вариаций интенсивностей в эмиссиях 557,7 и 630 нм ($\Delta I_{557,7}/\Delta I_{630}$) может достигать ~1 и более.

Возникающее противоречие может быть снято, если учесть времена жизни возбужденных метастабильных атомов OI в состояниях 1D (эмиссия 630 нм, радиационное время жизни ~110 с) и 1S (эмиссия 557,7 нм, радиационное время жизни ~1 с) на различных высотах слоя F_2 . Согласно [2] на высотах

180, 270 и 350 км, которым соответствуют относительные интенсивности эмиссии 630 нм 0,1; 1 и 0,1, времена жизни за счет газокинетических столкновений равны ~7, 80 и 123 с соответственно. В этом случае реализация реакции диссоциативной рекомбинации на высотах, где частота газокинетических столкновений становится больше или существенно больше обратной величины радиационного времени жизни соответствующего уровня, может приводить к гашению заселенности этого уровня за счет столкновений и снижению интенсивности. Для эмиссии 630 нм это реализуется на высотах нижней части слоя F_2 ~180÷250 км, для эмиссии 557,7 нм на существенно меньших высотах.

Оценим изменение $\Delta I_{557,7}/\Delta I_{630}$ при изменении высоты в реакции диссоциативной рекомбинации при ряде допущений. Диссоциативная рекомбинация с образованием OI в состояниях 1D и 1S осуществляется только с участием ионов O_2^+ (пренебрегаем участием ионов NO^+). Тогда интенсивности эмиссий 557,7 и 630 нм (соответственно 1S и 1D) в первом приближении могут быть записаны в виде

$$I_{S/D} = \beta_{S/D} K_{1S/D} [\text{O}_2^+][e] \left\{ \frac{1}{1 + (K_{2S/D}/A_{S/D})} \right\}, \quad (2)$$

где $\beta_{S/D}$ – число фотонов (с длиной волны 557,7 или 630 нм), испускаемых в одном акте реакции; $K_{1S/D}$ – коэффициент скорости диссоциативной реакции; $[\text{O}_2^+]$ и $[e]$ соответственно концентрации ионов O_2^+ и электронов; $K_{2S/D}$ – коэффициенты дезактивации состояний 1S и 1D за счет столкновений с нейтралами; $A_{S/D}$ – вероятности радиационных переходов с уровней 1S и 1D . Тогда $I_{557,7}/I_{630}$ может быть записано

$$I_{557,7}/I_{630} = (\beta_S/\beta_D)(K_{1S}/K_{1D}) \times \left\{ \frac{1}{1 + (K_{2S}/A_S)} \right\} / \left\{ \frac{1}{1 + (K_{2D}/A_D)} \right\}. \quad (3)$$

Коэффициенты дезактивации K_{2S} и K_{2D} могут быть заменены соответствующими частотами газокинетических столкновений ν_S и ν_D , и для оценки положено, что $\nu_S \approx \nu_D \approx \nu$.

Допустим также, что величина $(\beta_S/\beta_D) \times (K_{1S}/K_{1D})$ в выражении (3) не претерпевает существенных изменений в рассматриваемом диапазоне высот ~180–350 км. Тогда отношение $I_{557,7}/I_{630}$ может существенным образом зависеть от отношения

$$R = \left\{ \frac{1}{1 + (\nu/A_S)} \right\} / \left\{ \frac{1}{1 + (\nu/A_D)} \right\} = \frac{1 + (\nu/A_D)}{1 + (\nu/A_S)}. \quad (4)$$

Для высот 180, 270 и 350 км отношение R принимает значения ~50, ~9 и ~3 соответственно. Для оценки значения R (4) A_S и A_D полагались равными 1 и 0,009 с⁻¹ соответственно, а значения газокинетических сечений ν для соответствующих высот были взяты из [2].

Таким образом, оценка отношения $I_{557,7}/I_{630}$ (или $\Delta I_{557,7}/\Delta I_{630}$) в зависимости от высоты в реакции диссоциативной рекомбинации показывает возможность увеличения вклада эмиссии 557,7 нм по сравнению с эмиссией 630 нм по мере уменьшения высоты. И если в спокойных геомагнитных условиях интегрированное по высоте слоя F_2 отношение $I_{557,7}/I_{630}$ ($\Delta I_{557,7}/\Delta I_{630}$) имеет величину 0,1–0,3 (максимум высоты $I_{630} \sim 270$ км), то при появлении возмущений в нижней части слоя F_2 отношение $\Delta I_{557,7}/\Delta I_{630}$ может увеличиться в несколько раз, достигая ~ 1 и более.

Заключение

1. Вариации интенсивности $I_{557,7}$ нм во время слабых и умеренных магнитных возмущений на средних широтах не превышают вариаций этой эмиссии от других источников.

2. Во время геомагнитных бурь на средних широтах были отмечены интервалы времени, в течение которых наблюдались одновременные увеличения интенсивностей эмиссий 557,7 и 630 нм. Амплитуды этих вариаций достигали десятков–сотен рэлей.

3. Отмеченные увеличения интенсивностей эмиссий 557,7 и 630 нм соответствовали фазе понижения высоты максимума ионосферного слоя $h_m F_2$.

4. Механизмом, обеспечивающим наблюдаемые вариации интенсивностей эмиссий 557,7 и 630 нм в средних широтах в периоды геомагнитных бурь, может являться процесс диссоциативной рекомбинации с учетом высотного распределения возмущений ионосферных и атмосферных параметров.

5. Источником вертикального перемещения высоты максимума ионосферного слоя $h_m F_2$ и возмущений ионосферных и атмосферных параметров могут являться внутренние гравитационные волны, перемещающиеся ионосферные возмущения, а также электрические поля, возникающие во время геомагнитных бурь.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 09-05-00243-а, 08-05-92208-ГФЕН и программы Президиума РАН № 16 (часть 3).

L.A. Leonovich, A.V. Mikhalev, V.A. Leonovich. The 557.7 and 630 nm atomic oxygen mid-latitude airglow variations associated with geomagnetic activity.

In this paper, we analyze the mid-latitude airglow response to weak and moderate geomagnetic storms. Experimental observations of 557.7 and 630 nm atomic oxygen airglow in Eastern Siberia (52 N, 103 E) obtained in 1997–2009 are used. It has been found that during some geomagnetic storms there were simultaneous disturbances of variations in these emissions. In this paper, we discuss features of the observed emission disturbances, their probable sources and relation to magnetosphere-ionosphere structures.

1. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Медниереба, 1983. 270 с.
2. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Холмич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006, 741 с.
3. Silverman S.M., Ward F., Shapiro R. The Correlation between the 5577 Å Night Airglow Intensity and Geomagnetic Activity // J. Geophys. Res. 1962. V. 67, iss. 6. P. 2255–2264.
4. Трунце Ю.Л. Верхняя атмосфера во время геомагнитных возмущений // Полярные сияния и свечения ночного неба. 1973. № 20. М.: Наука. С. 5–22.
5. Кузьмин К.И. Колебания интенсивности эмиссий 5577 и 5893 Å и геомагнитная активность // Полярные сияния и свечения ночного неба. 1975. № 23. М.: Наука. С. 28–32.
6. Mukherjee G.K. Airglow and other F-layer variations in the Indian sector during the geomagnetic storm of February 5–7, 2000 // Earth Planets Space. 2006. V. 58, N 5. P. 623–632.
7. Misawa K., Takenchi I., Kato Y., Aoyma I. Intensity covariations of the oxygen green and red lines in the nightglow // Ann. Geophys. 1981. V. 37, N 4. P. 549–555.
8. Misawa K., Nakeuchi I., Kato Y., Aoyma I. Apparent progression of intensity variations of the oxygen red line // J. Atmos. and Terr. Phys. 1984. N 1. P. 39–46.
9. Silverman S.M. Night airglow phenomenology // Space Sci. Rev. 1970. V. 11, N 2–3. P. 341–379.
10. Miyoka H., Hirasawa T., Yumoto K., Tanaka Y. Low latitude aurora on October 21, 1989. I // Proc. Jap. Acad. B. 1990. V. 66, N 3. P. 47–51.
11. Афраймович Э.Л., Яшкалев Я.Ф., Аушев В.М., Белецкий А.Б., Водяников В.В., Леонович Л.А., Лесюта О.С., Михалев А.В., Яковец А.Ф. Одновременные радиофизические и оптические измерения ионосферного отклика во время большой магнитной бури 6 апреля 2000 г. // Геомагнетизм и аэрон. 2002. Т. 42, № 3. С. 383–393.
12. Михалев А.В., Белецкий А.Б., Костылева 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. // Косм. исслед. 2004. Т. 42, № 6. С. 616–621.
13. Barbier D. Recherches sur la raie 6300 de la luminescence atmosphérique nocturne // Ann. Geophys. 1959. V. 15, N 2. P. 179–217.
14. Gulledege J.S., Packer D.M., Tiford S.G., Vander-slice J.T. Intensity profiles of the 6300 Å and 5577 Å OI lines in the night airglow // J. Geophys. Res. 1968. V. 73, N 17. P. 5535–5547. DOI: 10.1029/JA073i17p05535.