

Возмущение свечения ночной верхней атмосферы во время геомагнитной бури 15 декабря 2006 г. над регионом Восточной Сибири

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

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

Поступила в редакцию 4.10.2010 г.

Исследовались вариации интенсивностей ночных эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм во время геомагнитной бури 15 декабря 2006 г. на средних широтах. Для анализа использовались данные оптических наблюдений, данные дигизонда и спутника GPS, полученные для региона Восточной Сибири (52° с.ш., 103° в.д.). Было отмечено, что во время этой бури в течение ночи наблюдались близкие по амплитуде возмущения вариаций рассматриваемых эмиссий, которые имели подобную форму и происходили синхронно. При этом вариации эмиссий 557,7 и 630 нм были коррелированы с возмущениями полного электронного содержания. Было предположено, что в этом случае возмущения эмиссии 557,7 нм могут быть результатом реакции диссоциативной рекомбинации O_2^+ и обусловлены вариациями параметров F -слоя ионосферы. Для интерпретации наблюдаемых соотношений интенсивностей возмущенных эмиссий 557,7 и 630 нм было проведено моделирование их высотных профилей.

Ключевые слова: эмиссии атомарного кислорода, источники возбуждения эмиссий атомарного кислорода, свечение верхней атмосферы, геомагнитные бури, моделирование; atomic oxygen emissions, sources of atomic oxygen emission excitation, airglow, geomagnetic storms, simulation.

Введение

Красная и зеленая эмиссии атомарного кислорода (630 и 557,7 нм соответственно) являются самыми яркими дискретными линиями, которые наблюдаются в спектре свечения ночного неба на средних широтах. Диссоциативная рекомбинация ионов O_2^+ и электронов является главным источником этих эмиссий в ночной термосфере в области F . Вариации интенсивностей обеих эмиссий тесно связаны с вариациями электронной концентрации и нейтральным составом на этих высотах. Интенсивность эмиссии 557,7 нм в слое F_2 составляет около 30% от эмиссии 630 нм в спокойных условиях [1]. Зеленая эмиссия также возбуждается в мезосфере посредством тройной рекомбинации атомов кислорода. Принято считать, что именно мезосфера дает основной вклад в интегральную величину этой эмиссии при спокойных условиях.

Следует отметить, что возмущения вариаций интенсивности эмиссии 630 нм во время геомагнитных возмущений относительно хорошо изучены [1–3]. В то же время результаты различных исследований реакции эмиссии 557,7 нм на геомагнитные бури имеют противоречивый характер [4–8].

Вопрос о соотношении объемных интенсивностей эмиссий атомарного кислорода 630 и 557,7 нм, расположенных в области F , а также интенсивностей свечения зеленых эмиссий, расположенных в области F и в мезосфере на высотах 85–120 км, во время магнитных бурь (МБ) на средних широтах остается неисследованным. Для низких широт в работе [7] было отмечено, что во время МБ вклад зеленой эмиссии из F -области в интегральную величину интенсивности свечения может значительно возрастать и даже доминировать над вкладом из мезосферы.

Настоящая статья посвящена изучению соотношения интенсивностей эмиссий атомарного кислорода 630 и 557,7 нм, возбуждаемых в ночной F -области термосферы во время МБ 15 декабря 2006 г. в регионе Восточной Сибири (52° с.ш., 103° в.д.).

Были использованы данные наблюдений эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм, полученные в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.). Измерения интенсивностей этих эмиссий проводились при помощи 4-канального зенитного фотометра «Феникс». Эмиссионные линии выделялись при помощи интерференционных качающихся светофильтров ($\Delta\lambda_{1/2} \sim 1\text{--}2$ нм). Угловое поле зрения каналов фотометра составляло $\sim 4\text{--}5^\circ$.

Для анализа ионосферных возмущений использовались данные критической частоты и высо-

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

ты максимума F_2 -слоя, полученные на дигизонде ст. Иркутск (52° с.ш., 104° в.д.), и данные полного электронного содержания (ПЭС), полученные с помощью глобальной навигационной системы (GPS). Эта система дает возможность детектирования возмущений ПЭС в ионосфере от различных источников искусственного и естественного происхождения. При помощи двухчастотных многоканальных приемников GPS осуществляются высокоточные измерения группового и фазового запаздывания между двумя когерентными сигналами на частотах $f_1 = 1575,42$ и $f_2 = 1227,60$ МГц на луче зрения между приемниками на земной поверхности и передатчиками на спутниках. Метод восстановления вариаций ПЭС из измерений приращений фазового и группового пути трансionoсферного радиосигнала описан в работах [9–11].

Результаты наблюдений и обсуждение

Рассматриваемая МБ с максимальным значением $K_p = 8+$, $K = 7$ (местный K -индекс) и минимальным значением $D_{st} = -147$ нТл продолжалась с 14.15 UT (SC) 14 декабря до 17 UT 15 декабря 2006 г. [12]. На фазе восстановления этой бури (15 декабря) наблюдалась необычная перестройка вертикальной структуры ночной ионосферы по данным ионосферной станции Иркутск. На ионограммах в ночные часы наблюдались значительное повышение критической частоты f_0F_2 , а также сильные вариации высоты максимума слоя h_mF_2 . Величина ΔhF_2 составила примерно 100 км. На рис. 1 приведены вариации критической частоты f_0F_2 , высоты максимума слоя h_mF_2 и эмиссий 630 и 557,7 нм, которые наблюдались 15 декабря 2006 г. Пунктирными линиями показаны средние характеристики критической частоты и высоты максимума слоя для спокойного дня 09.12.2006.

Как следует из рис. 1, в 18:00 критическая частота f_0F_2 уменьшилась в соответствии с суточным ходом. При этом высота максимума слоя F_2 понижалась в течение 1,5 ч, с 17:25 до 19:00 она уменьшилась на 90 км. Именно в это время (на фазе понижения высоты) одновременно наблюдается рост интенсивностей эмиссий 557,7 и 630 нм. Аналогичная ситуация для эмиссий 557,7 и 630 нм наблюдалась на фазе понижения высоты h_mF_2 в периоды после 21:00 и 03:00. Характер поведения высоты h_mF_2 после 23:00 однозначно указать нельзя из-за эффекта экранирования, хотя тенденция к уменьшению просматривается.

Таким образом, в результате анализа было отмечено, что во время этой бури в течение ночи возмущения эмиссий 557,7 и 630 нм происходили синхронно, имели подобную форму и близкие по величине амплитуды.

О вариациях интенсивности эмиссии 630 нм в магнитно-возмущенные периоды, коррелированные с вариацией высоты h_mF_2 , отмечается во многих работах (см., например, [1–3, 7]). О синхрон-

ных же вариациях интенсивностей эмиссий 557,7 и 630 нм в магнитно-возмущенные периоды отмечается лишь в единичных работах, и механизм их возникновения исследован недостаточно.

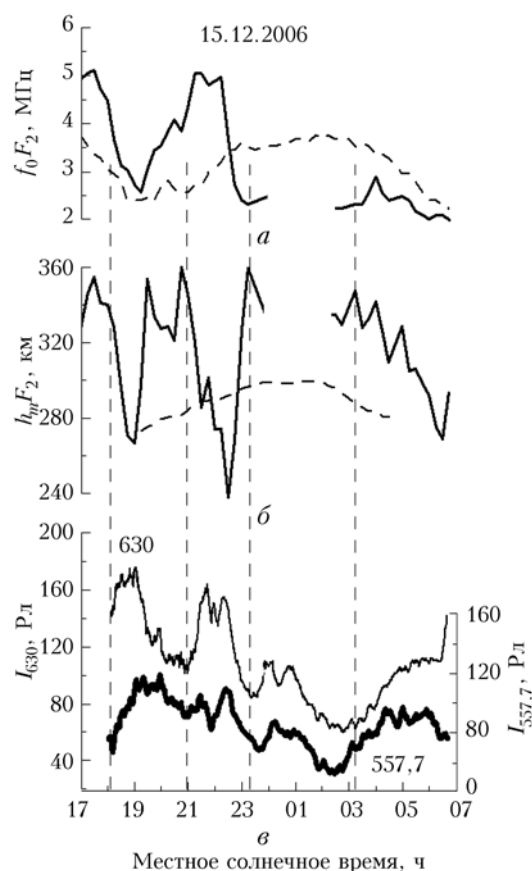


Рис. 1. Вариации критической частоты f_0F_2 , высоты максимума слоя h_mF_2 и эмиссий 630 и 557,7 нм во время геомагнитной бури 15 декабря 2006 г.

Так, в работе [13] было описано 4 подобных случая одновременных возмущений красной и зеленой линий, которые наблюдались в Японии ($35^\circ 15'$ с.ш., $139^\circ 44'$ в.д.). 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 цитируемой работы [13] предположили, что наблюдаемые вариации являются результатом неизвестного механизма, который приводит к одновременному подъему и опусканию слоев E_s и F . Также авторы утверждают, что такие явления очень редки для исследуемого региона.

Существует ряд нерешенных принципиальных вопросов, касающихся механизма возникновения вариаций эмиссий 557,7 и 630 нм на средних широтах. Один из таких вопросов связан с механизмом, который мог бы приводить к синхронному возбуждению красной эмиссии, расположенной на высотах 180–270 км и обусловленной взаимодействием заряженных компонентов, и зеленой эмиссии, расположенной на высотах 85–115 км и являющейся

результатом реакции столкновения нейтральных компонентов атмосферы.

В настоящей статье предпринята попытка оценить возможный вклад эмиссии 557,7 нм, возбуждаемой в ночной F -области термосферы, в наблюдаемые возмущения интенсивности этой эмиссии для условий рассматриваемой геомагнитной бури. Мы использовали данные GPS-измерений для анализа характеристик свечения атмосферных эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм во время геомагнитных возмущений. Коррелированные вариации ПЭС ионосферы и эмиссий 557,7 и 630 нм для временного интервала от 20:00 до 01:00 местного солнечного времени представлены на рис. 2.

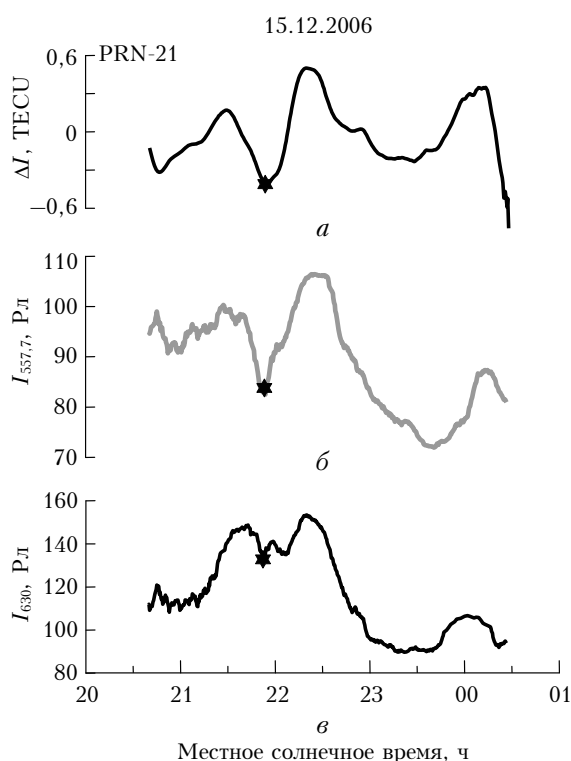


Рис. 2. Коррелированные вариации ПЭС ионосферы и эмиссий 557,7 и 630 нм во время геомагнитной бури 15 декабря 2006 г.

Вариации ПЭС ΔI были измерены на луче между наземной станцией и спутником GPS номер 21 (PRN-21). Звездочками помечен момент времени, когда координаты подыоносферной точки для PRN-21 были равны 51,8° с.ш. и 102,9° в.д. Подыоносферная точка — это проекция точки пересечения луча, воображаемого между наземной станцией и спутником GPS, и сферы на высоте максимума F_2 -слоя на земную поверхность. В этом случае можно полагать, что подыоносферная точка для рассматриваемого спутника находилась над пунктом оптических наблюдений (52° с.ш., 103° в.д.).

Исходя из того что диссоциативная рекомбинация ионов O_2^+ и электронов является главным источником эмиссий зеленой и красной линий атомарного кислорода в ночной F -области термосферы средних широт, вариации интенсивностей рассмат-

риваемых эмиссий тесно связаны с вариациями электронной концентрации на этих высотах. Следовательно, можно сказать, что они также связаны и с вариациями ПЭС. С другой стороны, ПЭС никак не связано с эмиссией зеленой линии, расположенной на высотах 85–120 км и обусловленной реакциями взаимодействия нейтральных компонентов атмосферы. Исходя из этого, можно предположить: корреляция вариаций ПЭС и эмиссии 557,7 нм свидетельствует о том, что в данном случае возмущение зеленой линии относится к F -области. Таким образом, мы можем использовать корреляцию вариаций ПЭС и эмиссии 557,7 нм как индикатор возмущения зеленой линии в F -области ионосферы.

Моделирование

Как было отмечено во введении, интенсивность эмиссии 557,7 нм в слое F_2 составляет около 30% от эмиссии 630 нм в спокойных условиях [1]. Вопрос о соотношении амплитуд этих эмиссий во время МБ на средних широтах остается неисследованным. Приведенные выше экспериментальные данные показали, что возмущения эмиссий зеленой и красной линий атомарного кислорода во время МБ 15 декабря 2006 г. имели близкие по величине амплитуды. Поэтому было предположено, что во время геомагнитных бурь соотношение между амплитудами возмущений интенсивностей красной и зеленой эмиссии, расположенной в F -области ионосферы, может изменяться.

Для проверки этой гипотезы были сделаны расчеты высотных профилей объемных интенсивностей эмиссий 557,7 ($V_{557.7}$, $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) и 630 нм (V_{630} , $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) для условий, близких к наблюдениям 15 декабря 2006 г. Выражения для $V_{557.7}$ и V_{630} были взяты из работы [14]:

$$V_{557.7} = A_{557.7} \frac{Qf(^1S)\gamma_1[e][O_2]}{k_1^*[O] + k_2^*[O_2] + k_3^*[N_2] + A_S},$$

$$V_{630} = A_{630} \frac{Qf(^1D)\gamma_1[e][O_2]}{k_1^{**}[O] + k_2^{**}[O_2] + k_3^{**}[N_2] + k_4^{**}[e] + A_D},$$

где $[e]$ — электронная концентрация; $[O]$, $[O_2]$, $[N_2]$ — концентрация атомов кислорода и молекул кислорода и азота соответственно; Q обозначает отношение $[O^+]/[e]$.

Исходя из того что дезактивация возбужденного состояния $O(^1S)$ при столкновениях с нейтральными компонентами в F -области незначительна [15, 16], выражение для объемной интенсивности эмиссии 557,7 нм можно переписать как

$$V_{557.7} = A_{557.7} \frac{Qf(^1S)\gamma_1[e][O_2]}{A_S}.$$

Коэффициенты ветвления $f(^1D)$ и $f(^1S)$ для образования возбужденных метастабильных состояний 1D и 1S в реакции диссоциативной реком-

бинации O_2^+ полагались равными соответственно 0,9 и 0,1 [17]. Значения скоростей реакций γ_1 , k_i^* , k_i^{**} и коэффициентов вероятностей квантовых переходов Эйнштейна A_k , используемые в расчетах, взяты из работы [14] и приведены ниже:

$$\begin{aligned} k_1^{**} &= 8,0 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \\ k_2^{**} &= 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \\ k_3^{**} &= 2,3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \\ k_4^{**} &= 6,2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \\ A_s &= 1,35 \text{ с}^{-1} \\ A_{557,7} &= 1,18 \text{ с}^{-1} \\ A_D &= 7,45 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1} \\ A_{630} &= 5,63 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1} \\ \gamma_1 &= 2,0 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \end{aligned}$$

Для получения пространственно-временных вариаций температуры атмосферы, концентраций нейтральных компонентов O , O_2 , N_2 и H использовалась глобальная эмпирическая модель термосферы MSIS-86 [18]. Концентрации электронов, ионов и их температур были получены из модели IRI [19]. Для моделирования высотных профилей электронной концентрации использовались значения критических частот слоя f_0F_2 и высот максимума слоя h_mF_2 , полученные из измерений дигизонда во время этой МБ. На рис. 3 показаны результаты моделирования.

Высотные профили электронной концентрации N_e для случаев, когда максимум слоя F_2 находился на высотах 300, 260 и 240 км, представлены на рис. 3, $z-e$ соответственно. На рис. 3, $a-e$ показаны соответствующие им высотные профили скоростей объемных эмиссий 630 (штриховая линия) и 557,7 нм (сплошная). Результаты моделирования показали, что во время МБ при понижении высоты максимума слоя F_2 соотношение скоростей объемных эмиссий $V_{557,7}/V_{630}$ изменяется. Если для случая, когда высота максимума F_2 равна 300 км, соотношение скоростей объемных эмиссий $V_{557,7}/V_{630}$ составляло 0,4, то для высоты максимума 240 км это соотношение приблизилось к единице.

Заключение

На основе анализа вариаций эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм ночной верхней атмосферы во время магнитной бури 15 декабря 2006 г. в регионе Восточной Сибири (52° с.ш., 103° в.д.) с использованием данных оптических и радиофизических наблюдений и моделирования получены следующие выводы.

– На фазе восстановления МБ 15 декабря 2006 г. в течение ночи отмечаются значительное повышение критической частоты f_0F_2 и сильные вариации высоты максимума F_2 -слоя. Характерной особенностью поведения вариаций эмиссий 557,7 и 630 нм во время этой магнитной бури является увеличение их интенсивностей на фазе понижения высоты максимума слоя h_mF_2 .

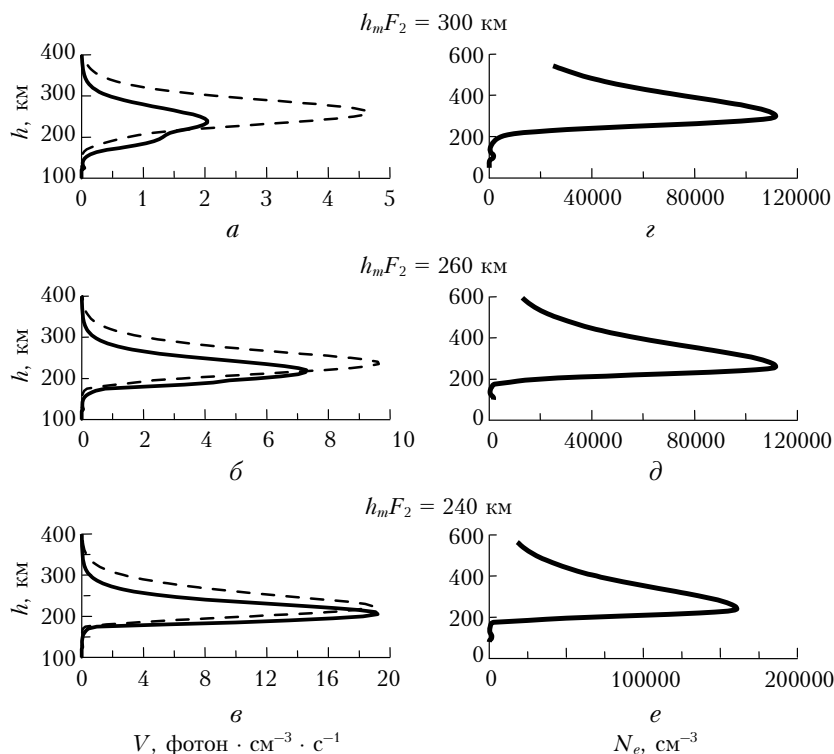


Рис. 3. Результаты моделирования высотных профилей электронной концентрации для случаев, когда максимум слоя F_2 находился на высотах 300 (z), 260 (d) и 240 (e) км, и соответствующие им высотные профили скоростей объемных эмиссий 630 нм (штриховая линия) и 557,7 нм (сплошная линия) – a , b и e

– Возмущения эмиссий атомарного кислорода 630 и 557,7 нм во время геомагнитных бурь на средних широтах могут происходить синхронно и иметь подобную форму и близкие по величине амплитуды. В таких случаях источником возмущения эмиссии 557,7 нм может быть диссоциативная рекомбинация в *F*-области ионосферы.

– Корреляция вариаций ПЭС и эмиссии 557,7 нм является индикатором того, что в данном случае эта эмиссия формируется в *F*- или *E*-областях ионосферы.

– Соотношение между амплитудами возмущений интенсивностей зеленой и красной эмиссий, расположенных в *F*-области ионосферы, зависит от высоты максимума *F*₂-слоя. При понижении максимума *F*₂-слоя это соотношение увеличивается.

Мы искренне благодарим А.В. Тащилина, Г.К. Матафонова, Е.Б. Романову за полезные дискуссии, а также Н.В. Костылеву за помощь в анализе данных и К.Г. Ратовского за предоставленные ионосферные данные.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 09-05-00243-а, 10-05-00786-а, 11-05-91153-ГФЕН_а и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4 (научное направление № 8).

1. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
2. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 270 с.
3. Misawa K., Nakeuchi I., Kato Y., Aoyama I. Apparent progression of intensity variations of the oxygen red line // *J. Atmos. Terr.-Phys.* 1984. V. 46, N 5. N 1. P. 39–46.
4. Кузьмин К.И. Колебания интенсивности эмиссий 5577 и 5893 Å и геомагнитная активность // Полярные сияния и свечения ночного неба. М.: Наука, 1975. № 23. С. 28–32.
5. Трутце Ю.Л. Верхняя атмосфера во время геомагнитных возмущений // Полярные сияния и свечения ночного неба. М.: Наука, 1973. № 20. С. 5–22.
6. 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, N 6. P. 2255–2264.

7. 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.

8. Леонович Л.А., Михалев А.В., Леонович В.А. Вариации среднеширотных атмосферных эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм, связанные с геомагнитной активностью // *Оптика атмосфер. и океана*. 2011. V. 24, № 3. С. 242–247.

9. Fitzgerald T.J. Observations of total electron content perturbations in GPS signals caused by a ground level explosion // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 1997. V. 59, N 7. P. 829–834.

10. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., and Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice*. Wien; New York: Springer-Verlag, 1992. 327 p.

11. Horan D.M., Kreplin R.W. Simultaneous measurements of EUV and soft X-ray solar flare emission // *Sol. Phys.* 1981. V. 74, N 1. P. 265–272.

12. URL: <http://sgd.ngdc.noaa.gov/sgd/jsp/solarindex.jsp> Solar-Geophysical data

13. Misawa K., Takenchi I., Kato Y., Aoyama I. Intensity covariations of the oxygen green and red lines in the nightglow // *Ann. geophys.* 1981. V. 37, N 4. P. 549–555.

14. Meneses F.C., Muralikrishna P., Clemesha B.R. Height profiles of OI 630 nm and OI 557,7 nm airglow intensities measured via rocket-borne photometers and estimated using electron density data: a comparison // *Geophys. Int.* 2008. V. 47, N 3. P. 161–166.

15. Омхольт А. Полярные сияния. М.: Мир, 1974. 248 с.

16. Vlasov M.N., Nicolls M.J., Kelley M.C., Smith S.M., Aponte N., Gonzalez S.A. Modeling of airglow and ionospheric parameters at Arecibo during quiet and disturbed periods in October 2002 // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A07303. doi:10.1029/2005JA011074.

17. Kella D., Vejby-Christensen L., Johnson P.J., Pedersen H.B., Andersen L.H. The Source of Green Light Emission determined from a Heavy-Ion Storage Ring Experiment // *Science*. 1997. V. 276, N 5318. P. 1530–1533.

18. Hedin A.E., Biondi M.A., Burnside R.G., Hernandez G., Johnson R.M., Killeen T.L., Meriwether J.W., Salath J.E., Sica R.J., Smith R.W., Spencer N.W., Wickwar V.B., Viridi T.S. Revised global model of thermosphere winds using satellite and ground-based observation // *J. Geophys. Res. A*. 1991. V. 96, N 5. P. 7657–7688.

19. Bilitza D. *International Reference Ionosphere 2000* // *Radio Sci.* 2001. V. 36, N 2. P. 261–275.

L.A. Leonovich, A.V. Mikhalev, V.A. Leonovich. The nocturnal upper atmosphere airglow disturbance during December 15, 2006 geomagnetic storm over Eastern Siberia region.

Variations of OI 630 and OI 557.7 nm airglow intensities in the nocturnal mid-latitude thermosphere during the geomagnetic storm of December 14–15, 2006 are under consideration. The analysis is based on optical, digisonde and GPS observations obtained for Eastern Siberia (52°N, 103°E). It has been found that there were close in amplitude and shape simultaneous disturbances of variations of the emissions under study during this storm. At the same time the variations of OI 630 and OI 557.7 nm airglow intensities correlated with the total electron content. It has been suggested that in this case the 557.7 nm emission disturbances might have resulted from the O₂⁺ dissociative recombination reaction and ionospheric *F*-layer characteristic variations. To interpret the ratio of the observed 557.7 and 630 nm disturbed emission intensities, we have simulated their height profiles.