

А.В. Михалев, К.Г. Ратовский, А.В. Медведев,  
М.А. Черниговская, И.В. Медведева

## Одновременные наблюдения усиления атмосферной эмиссии 557,7 нм [OI] и образования спорадических слоев в периоды температурных возмущений в страто-мезосфере

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 10.07.2007 г.

Анализируется событие одновременного усиления ночного излучения верхней атмосферы в линии атомарного кислорода 557,7 нм и образования спорадического слоя  $E_s$  в средних широтах в период температурного возмущения на высотах стратосферы и мезосферы в декабре 2006 г.

Ионосферные данные получены с помощью дигизонда DPS-4, расположенного непосредственно в Иркутске (52,5° с.ш., 104,3° в.д.). Оптические наблюдения проводились в Геофизической обсерватории, удаленной от Иркутска на расстояние ~130 км, с помощью 4-канального зенитного фотометра и цветной CCD-камеры. Данные о вертикальных профилях температуры атмосферы получены с помощью сканирующего сверхвысокочастотного (СВЧ) лимбового зонда MLS, установленного на борту космического аппарата Aura.

В ряде случаев наблюдались согласованные суточные вариации интенсивности эмиссии 557,7 нм и характеристик слоя  $E_s$ . Тот факт, что корреляция наблюдается не всегда, связан, очевидно, с различными пространственными локализациями  $E_s$ -слоя и эмиссионного слоя в некоторые периоды времени, а также с особенностями динамики этих образований. В период максимального усиления оптического излучения верхней атмосферы отмечалась его выраженная пространственная неоднородность, регистрируемая CCD-камерой в континууме.

Обсуждается возможный вклад механизма возбуждения уровня  $O(^1S)$  за счет соударений с электронами спорадического  $E_s$ -слоя в усиление эмиссии 557,7 нм в периоды стратосферных потеплений.

### Введение

Возбуждение атмосферной эмиссии 557,7 нм в средних широтах в невозмущенных условиях осуществляется в цепи фотохимических реакций с участием нейтральных атмосферных компонентов. Высоты излучающего слоя эмиссии 557,7 нм лежат в диапазоне 85–115 км [1]. Для эмиссии 557,7 нм хорошо известен факт усиления ее интенсивности во время внезапных зимних стратосферных потеплений [2], которые связывают с планетарными волнами, приводящими к нарушению циркуляции атмосферы и усилению вертикального переноса. В этом же диапазоне высот в средних широтах отмечается появление спорадических слоев  $E_s$ , которые имеют наибольшую вероятность регистрации в летние месяцы [3]. В некоторых работах отмечается корреляция характеристик эмиссии 557,7 нм и спорадических слоев  $E_s$ . Например, в работе [4] усиление эмиссии 557,7 нм связывали с увеличением электронной концентрации спорадического слоя  $E_s$ .

Обычно возмущения в вариациях эмиссии 557,7 нм, обусловленные стратосферными потеплениями и образованием спорадических слоев, наблюдаются и исследуются независимо, вероятно из-за существенных различий в их сезонном ходе.

В настоящей статье представлены данные наблюдений возмущений излучения верхней атмосферы

в линии атомарного кислорода 557,7 нм, когда одновременно отмечались образование спорадического  $E_s$ -слоя и температурные возмущения на высотах стратосферы и мезосферы. Наблюдения относятся к периоду зимнего солнцестояния в декабре 2006 г.

### 1. Аппаратура и данные наблюдений

#### *Оптические измерения*

Оптические наблюдения проводились в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (Восточная Сибирь, Тункинская долина, 52° с.ш., 103° в.д.). Измерения собственного оптического излучения верхней атмосферы проводились с помощью 4-канального зенитного фотометра с выделением линий атомарного кислорода [OI] 557,7 и 630 нм, а также ультрафиолетовой (360–410 нм) и ближней инфракрасной (720–830 нм) областей спектра. 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.

Программное обеспечение фотометра позволяло записывать данные фотометрических каналов с усреднением ~12 с. Для регистрации пространственных неоднородностей и волн в свечении атмосферы использовалась CCD-камера ночного неба на основе аппарата Nikon Coolpix 5400 с цветной CCD-матрицей, работающей в цветовом пространстве R–G–B. Блок управления камерой обеспечивал автоматическое включение камеры с интервалом ~10 мин в течение всего ночного периода наблюдений. Использовался режим накопления сигнала с временем экспозиции 5 мин и вычитанием шума матрицы с аналогичным временем экспозиции шума 5 мин. Угловое поле зрения CCD-камеры составляло ~65×50° соответственно по вертикали и горизонтали. Камера была ориентирована в северном направлении и охватывала зенитные расстояния ~10–75°.

### **Радиофизические измерения**

Характеристики ионосферного спорадического слоя  $E_s$  были получены с помощью цифрового ионозонда вертикального зондирования DPS-4 [5], установленного в Иркутске в декабре 2002 г. Были использованы следующие характеристики слоя  $E_s$ :  $f_0E_s$  — критическая частота слоя, определяющая максимальную электронную концентрацию в слое  $N_mE_s(\text{см}^{-3}) = [f_0E_s(\text{МГц})]^2/8,06$ ;  $E_s$  — высота слоя;  $PE_s$  — наблюдаемость ночного слоя  $E_s$ , т.е. отношения числа регистраций спорадического слоя к полному числу наблюдений в течение ночи.

### **Данные о вертикальных профилях температуры**

Эти данные были получены с помощью сканирующего сверхвысокочастотного (СВЧ) лимбового зонда MLS, установленного на борту космического аппарата Aura (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/MLS/index.shtml>). Данные измерений зонда MLS Aura используются для восстановления профилей химического состава, относительной влажности и температуры для областей атмосферы от тропосферы, стратосферы до верхней мезосферы. Спутник имеет полярную орбиту высотой 705 км, пространственный охват почти глобален (от  $-82^\circ$  до  $+82^\circ$  по широте). Вертикальное разрешение измерений составляет приблизительно 3 км. Каждый вертикальный профиль измеряется через  $1,5^\circ$  (~165 км) вдоль траектории орбиты. В сутки осуществляется примерно 15 пролетов спутника.

## **2. Результаты наблюдений и обсуждение**

### **Межсуточные вариации**

С 12 по 16 декабря 2006 г. на уровне стратосферы (~40 км) наблюдался мощный очаг потепления с максимальной температурой порядка 300 К, зарегистрированной 14 декабря (отмечено точкой  $T_{SW\max}$ ,

рис. 1, б). По данным оптических наблюдений в период с 18 по 21 декабря отмечалось существенное усиление интенсивностей эмиссии 557,7 нм при пиковом значении 290 Рл для средней ночной эмиссии 21 декабря (рис. 1, а).

Период с 18 по 22 декабря характеризовался значительным улучшением наблюдаемости ночного спорадического слоя  $E_s$  (см. рис. 1, а). Наилучшая наблюдаемость, равная 78% (при среднемесечном значении 25%), соответствует 22 декабря.

В настоящей статье выдвигается версия, что стратосферное потепление, увеличение интенсивностей эмиссии 557,7 нм и усиление образования спорадического слоя  $E_s$  являются следствиями одного и того же атмосферного процесса, который распространяется снизу вверх от высот стратосферы до нижней термосферы и, возможно, выше. Сопоставление по рис. 1, б возмущений на высотах стратосферы ~40 км (точка  $T_{SW\max}$ ) и высотах слоя  $E_s$  ~107 км ( $PE_{s\max}$ , %) показывает, что задержка между процессами составляет 7–8 сут, что приблизительно соответствует вертикальной скорости перемещения возмущения 8,5–9,5 км/сут. На рис. 1, б показаны изолинии температуры и направление перемещения предполагаемых температурных возмущений со стратосферных высот со скоростью ~9 км/сут.

Исходя из того что задержка между усилением образования спорадического слоя (точка  $PE_{s\max}$ ) и увеличением интенсивностей эмиссии 557,7 нм (точка  $I_{\max}$ ) составляет ~1 сут, оценка высотной области высвечивания эмиссии 557,7 нм дает диапазон 97,5–98,5 км. Полученные значения несколько отличаются от сезонного значения высоты максимума излучающего слоя этой эмиссии для конца декабря, которое согласно эмпирической модели [6] для широты  $52^\circ$  составляет ~93,5 км.

Усиление эмиссии 557,7 нм, наблюдаемое через несколько дней после образования в исследуемом регионе очага устойчивого увеличения температуры на высотах стратосферы, хорошо согласуется с типичным поведением этой эмиссии в периоды стратосферных потеплений [1]. Обычно считается, что снижение высоты излучающего слоя эмиссии 557,7 нм (т.е. высоты наиболее эффективного возбуждения) сопровождается увеличением интенсивности этой эмиссии. В рассматриваемом случае полученная оценка высоты области высвечивания может указывать на механизм увеличения интенсивности эмиссии 557,7 нм во время стратосферных потеплений, связанный с реализацией наиболее эффективного возбуждения на других (по сравнению с невозмущенными условиями) высотах.

Эффективность возбуждения в данном случае может быть обусловлена как увеличением концентрации атмосферных составляющих (обуславливающих заселение уровня  $^1S$  атомарного кислорода, например O и O<sub>2</sub>) и толщины излучающего слоя, так и уменьшением концентрации атмосферных составляющих, дезактивирующих заселение уровня  $^1S$  атомарного кислорода (т.е. изменением соотношения между атмосферными составляющими, участвующими

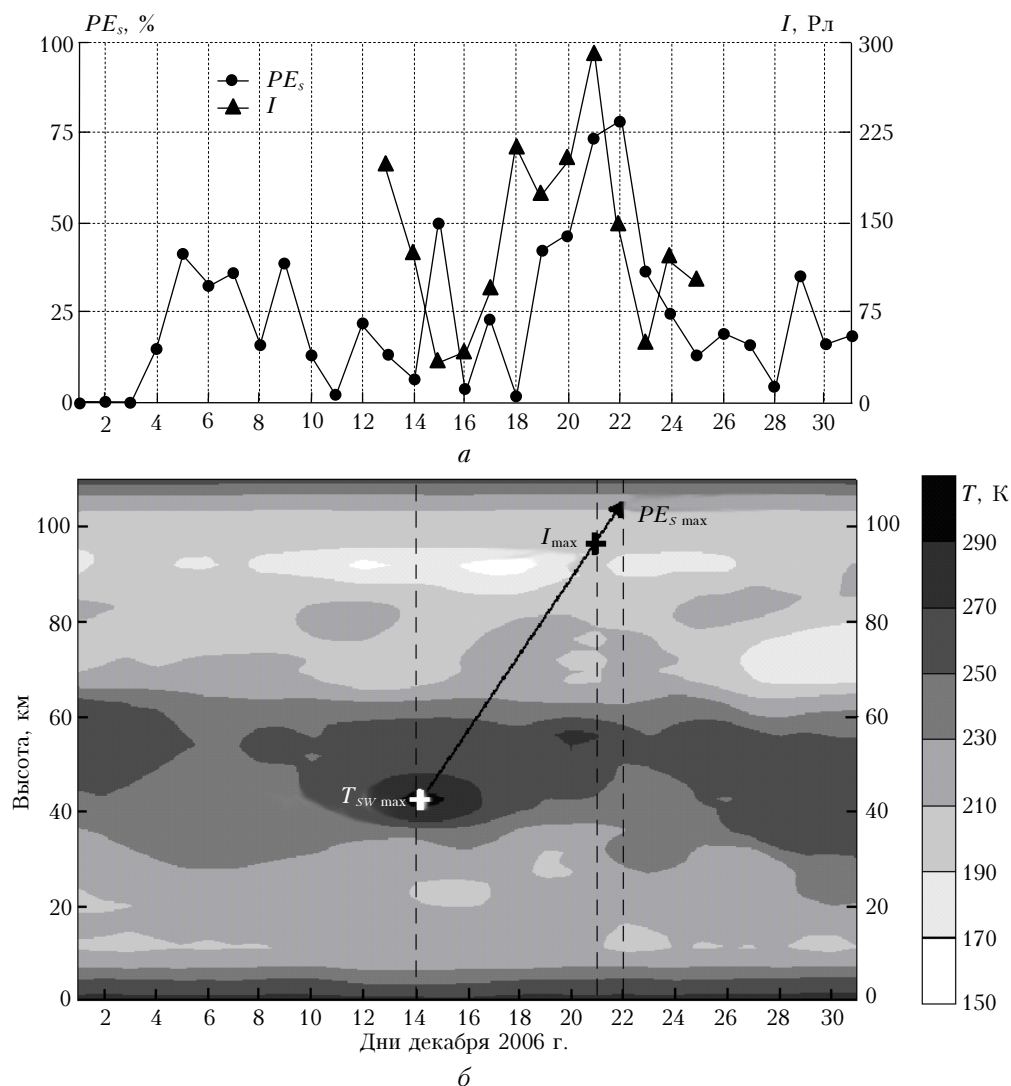


Рис. 1. Вариации средних ночных значений интенсивности эмиссии 557,7 нм, наблюдаемости ночного спорадического слоя  $E_s$  и высотно-временное распределение температуры атмосферы для декабря 2006 г.

в возбуждении и гашении уровня  $^1S$ ). Полученная оценка высоты излучающего слоя эмиссии 557,7 нм, статистика наблюдений которой в период стратосферных потеплений практически отсутствует, может использоваться в эмпирических моделях вариаций характеристик этой эмиссии [6].

В работе [7] отмечалось, что спорадическая ионизация в ионосферном слое  $E$  является чувствительным индикатором стратосферных возмущений. В то же время авторы работы утверждали, что стратосферное потепление приводит к уменьшению ветрового сдвига, что в свою очередь должно привести к уменьшению образования спорадического слоя. В нашем случае наблюдается противоположное явление — усиление образования слоя  $E_s$ , т.е. усиление ветрового сдвига. Возможно, это противоречие связано с тем, что мы анализируем характеристики слоя  $E_s$  не непосредственно во время стратосферного потепления, а спустя 6–10 сут. В общем случае как усиление эмиссии 557,7 нм, так и рост наблюдаемости слоя  $E_s$  могут быть обусловлены регистрируе-

мыми в этот период времени на уровне стратосферы и мезосферы планетарными волнами (<http://strat-www.met.fu-berlin.de/>).

### Внутрисуточные вариации

На рис. 2 приведены внутрисуточные вариации интенсивности  $I$  эмиссии 557,7 нм, значений  $f_0E_s$  и высоты спорадического слоя  $E_s$  для двух дней — 20 и 21 декабря 2006 г.

Считается, что для атмосферной эмиссии 557,7 нм в зимние месяцы чаще всего имеет место ночной ход с плавным максимумом около местной полуночи, который интерпретируют модой  $S_4^2$  солнечного термического полусуточного прилива. При этом достаточно часто на регулярный ночной ход эмиссии 557,7 нм накладываются более короткопериодические вариации, которые обычно связывают с внутренними гравитационными волнами (ВГВ) [1]. В анализируемые ночи декабря 2006 г. «классического» ночного хода для эмиссии 557,7 нм зарегистрировано

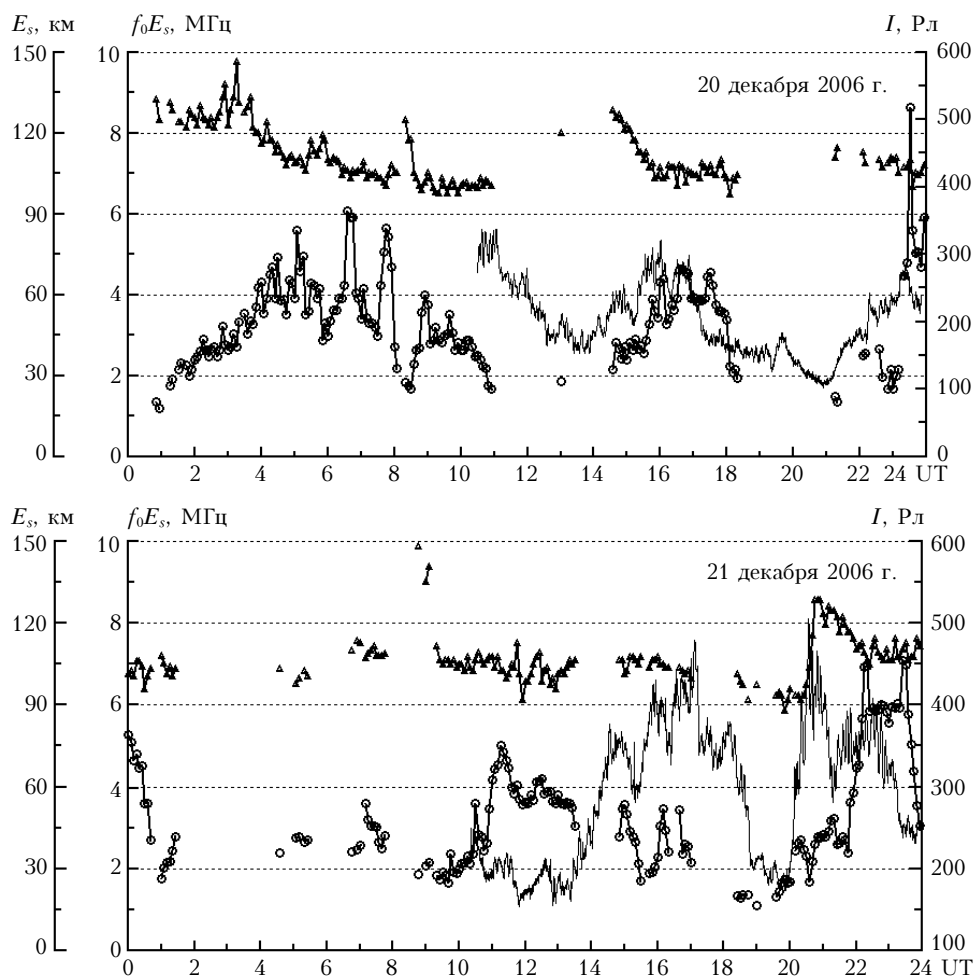


Рис. 2. Вариации интенсивности  $I$  эмиссии 557,7 нм (сплошные линии), значений  $f_0 E_s$  (кружки) и высоты спорадического слоя  $E_s$  (треугольники) для 20 и 21 декабря 2006 г.

не было, хотя в отдельные ночи можно выделить максимумы (см. рис. 2) около местной полуночи (17 UT). В большинстве случаев в ночном ходе эмиссии 557,7 нм присутствуют колебания с периодами около 6–8 ч, на которые наложены нерегулярные вариации меньших периодов. Это указывает на присутствие в атмосфере на высотах высвечивания эмиссии 557,7 нм достаточно сильных возмущений атмосферных параметров.

На наличие сильных мелкомасштабных пространственных неоднородностей атмосферы указывают и данные регистрации свечения верхней атмосферы CCD-камерой.

На рис. 3 представлены два последовательных кадра (с интервалом 10 мин) изображения свечения атмосферы в цветовом канале G CCD-камеры для 21 декабря 2006 г.

Изображения подвергались одинаковой процедуре обработки яркостных каналов для выделения неоднородностей. Следует заметить, что подобные по своим характеристикам пространственные неоднородности свечения атмосферы ранее не отмечались (измерения CCD-камерой проводились в течение

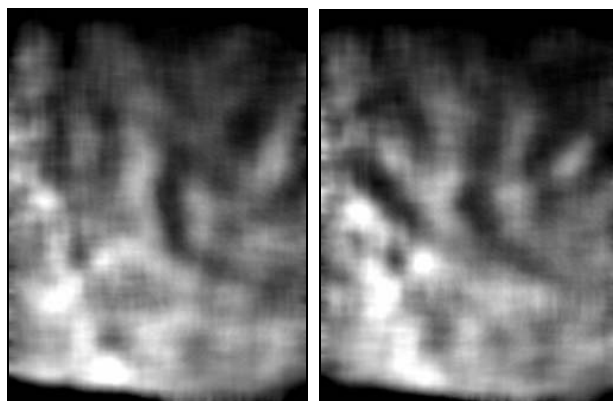


Рис. 3. Два последовательных кадра изображения свечения атмосферы в цветовом канале G CCD-камеры для 21 декабря 2006 г.

1–2 нед ежемесячно в периоды новолуний с осени 2005 г.). Предварительный анализ данных CCD-камеры показал, что в отличие от регистрируемых ранее в отдельных случаях волновых возмущений, для которых можно было определить направление

и скорость их перемещений, пространственные неоднородности свечения атмосферы 21 декабря 2006 г. в большей степени представляли собой меняющиеся от кадра к кадру постоянно существующие неоднородности. При этом характерный масштаб этих неоднородностей сохранялся и составлял  $\sim 10\text{--}15^\circ$ .

Излучение, регистрируемое в цветовых R–G–B-каналах CCD-камеры, в большей степени обусловлено континуумом собственного свечения верхней атмосферы, так как при больших спектральных интервалах регистрации ( $\sim 100\text{--}150$  нм) континуум становится основным компонентом в свечении ночной атмосферы [1]. Максимум высоты излучения континуума составляет около 90 км, что позволяет оценить характерный пространственный масштаб неоднородностей  $\sim 18\text{--}24$  км. Пространственные неоднородности в свечении атмосферы на мезосферных высотах с аналогичными пространственными масштабами являются типичными и связываются с мелкомасштабными ВГВ (см., например, [8]).

Характерные по масштабам периоды в несколько часов выделяются и в параметрах слоя  $E_s$ . При этом в большинстве случаев вариации интенсивностей эмиссии 557,7 нм и параметров слоя  $E_s$  не являются синфазными (см. рис. 2). Если допустить, что вариации с периодами несколько часов обусловлены распространением на исследуемых высотах ВГВ, то это может также указывать на несовпадения высот эмиссионного слоя 557,7 нм и образования слоя  $E_s$ . Считается, что ВГВ, в основном, приходят из более низких слоев атмосферы. По имеющимся данным невозможно выделить преимущественное направление. Тем не менее можно оценить характерную скорость распространения возмущений по полученной разности высот между средней высотой слоя  $E_s$  и высотой эмиссионного слоя  $\sim 5\text{--}10$  км и по характерным временным сдвигам между максимумами в вариациях интенсивности эмиссии 557,7 нм и значений  $f_0$  спорадического слоя  $E_s$   $\sim 3\text{--}7$  ч. Оценки дают скорости распространения короткопериодических возмущений  $\sim 0,7\text{--}3$  км/ч. В связи с этим представляют интерес результаты работы [9], в которой исследовалась связь вариаций высоты слоя  $E_s$  и интенсивности ночного свечения эмиссии 557,7 нм, и также оценивалась вертикальная скорость возмущения. В работе [9] полученные значения вертикальных скоростей возмущений лежат в диапазоне  $1\text{--}6$  км/ч, а сами возмущения анализируемых параметров интерпретируются распространением ВГВ.

Следует также отметить важный момент возможности вклада образования спорадического слоя  $E_s$  в увеличение интенсивности эмиссии 557,7 нм согласно реакции  $O + e \rightarrow O(^1S) + e$  [9]. В частности, в работе [4] связывают увеличение электронной концентрации в спорадическом слое  $E_s$  с усилением интенсивности эмиссии 557,7 нм. Для рассматриваемых геофизических условий, в отсутствие синфазных вариаций в характеристиках спорадического слоя  $E_s$  и интенсивности эмиссии 557,7 нм, нет оснований считать, что эта реакция вносит существенный вклад в усиление интенсивности эмиссии 557,7 нм. Тем не менее вопрос о количествен-

ном вкладе этого процесса в общую интенсивность эмиссии 557,7 нм в конкретной геофизической ситуации остается открытым и, вероятно, требует отдельного рассмотрения.

Таким образом, предварительный анализ температурного режима страто-мезосферы, ионосферных данных и данных свечения верхней атмосферы в эмиссии 557,7 нм указывает на проявление известного эффекта повышенной зимней изменчивости параметров мезосферы [10] в рассматриваемый период. Этот эффект выражается в усилении волновой активности различных временных масштабов в средней и верхней атмосфере и, как правило, сопровождается комплексом явлений – внезапными зимними стратосферными потеплениями, усилением вертикального переноса, турбулентных процессов, нарушением атмосферной циркуляции и др. При этом некоторые из указанных явлений обнаруживаются в виде пространственных, широтно-долготных неоднородностей (см., например, [11]). Важным представляется оценка высоты возмущенного эмиссионного слоя 557,7 нм в период стратосферного потепления. Знание этой высоты может указывать на возможный механизм увеличения интенсивности эмиссии 557,7 нм во время развития стратосферных температурных возмущений.

## Выводы

1. В период зимнего солнцестояния в декабре 2006 г. в регионе Восточной Сибири зарегистрированы одновременное усиление ночного излучения верхней атмосферы в линии атомарного кислорода 557,7 нм и образование спорадического слоя  $E_s$  в средних широтах в период температурного возмущения на высотах стратосферы, которые связываются с усилением волновой активности (планетарные волны, ВГВ) в атмосфере в этот период.

2. Сравнительный анализ вариаций суточных значений характеристик эмиссионного слоя 557,7 нм, спорадического слоя  $E_s$  и динамики вертикальных профилей температуры атмосферы позволил оценить высоту слоя эмиссии 557,7 нм в период стратосферного потепления.

3. Предварительный анализ вариаций характеристик эмиссионного слоя 557,7 нм и спорадического слоя  $E_s$  не дает оснований связывать внутрисуточные возмущения интенсивности эмиссии 557,7 нм с образованием спорадического слоя  $E_s$  в рассматриваемых геофизических условиях и оставляет открытым вопрос о вкладе электронной концентрации спорадического слоя  $E_s$  в общую интенсивность эмиссии 557,7 нм.

Настоящая работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 16 (часть 3).

1. *Фишкова Л.М.* Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 271 с.
2. *Fukuyama K.* Airglow variations and dynamics in the lower thermosphere and upper mesosphere III. Variations during stratospheric warming events // J. Atmos. and Terr. Phys. 1977. V. 39. N 3. P. 317–331.

3. *Шерстюков О.Н., Рябченко Е.Ю.* Частотно-временной анализ синоптических колебаний в параметрах среднеширотного спорадического слоя ионосферы // Электронный журнал «Исследовано в России». <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/177.pdf>
4. *Шарадзе З.С., Квавадзе К.Д., Киквилашвили Г.Б., Мацаберидзе В.С.* Динамика среднеширотного спорадического слоя E ионосферы и свечение ночной атмосферы OI 5577 Å // Ионосферные исследования. 1985. № 38. С. 60–66.
5. *Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K.X., Galkin I., Huang X., Kitrosser D.F., Sales G.S., Scali J.L.* Ionospheric sounding support of OTH radar // Radio Sci. 1997. V. 32. N 4. P. 1681–1694.
6. *Семенов А.И., Шефов Н.Н.* Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм в ночное время. 3. Высота излучающего слоя // Геомагнетизм и аэрон. 1997. Т. 37. № 4. С. 105–111.
7. *Kazimirovsky E., Herraiz M., De La Morena B.A.* Effects on the ionosphere Due to Phenomena Occurring below it // Surv. Geophys. 2003. V. 24. N 2. P. 139–184.
8. *Smith S.M., Mendillo M., Baurgardner D., Clark R.R.* Mesospheric gravity wave imaging at subauroral site: First results from Milstone Hill // J. Geophys. Res. A. 2000. V. 105. N 12. P. 27119–27130.
9. *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю.* Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
10. *Гинзбург Э.И., Гуляев В.Т., Жалковская Л.В.* Динамические модели свободной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 292 с.
11. *Mikhalev A.V., Medvedeva I.V., Kazimirovsky E.S., Potapov A.S.* Seasonal variation of upper-atmospheric emission in the atomic oxygen 555 nm line over East Siberia // Adv. Space Res. 2003. V. 32. N 9. P. 1787–1792.

*A.V. Mikhalev, K.G. Ratovsky, A.V. Medvedev, M.A. Chernigovskaya, I.V. Medvedeva.* **Simultaneous observations of the 557.7 nm upper atmosphere airglow intensification and occurrence of sporadic layers during temperature disturbances in strato-mesosphere.**

In the present work the event of simultaneous intensification of 557.7 nm airglow and high occurrence of sporadic layer  $E_s$  in middle latitudes during temperature disturbances at heights of stratosphere and mesosphere in December, 2006 is analyzed.

Ionosphere data were obtained with the DPS-4 ionosonde located directly in Irkutsk (52.5 N, 104.3 E). Airglow measurements were made with a 4-channel zenith photometer and all-sky CCD imager at ISTP Geophysical observatory located 130 km southwest of Irkutsk. Also we analyzed atmospheric temperature height profiles measured by the Microwave Limb Sounder (MLS) aboard the EOS Aura spacecraft.

In some cases correlated diurnal variations of 557.7 nm airglow intensity and  $E_s$  characteristics were observed. The fact that this correlation was not always observed, can well be explained by the different spatial localization of  $E_s$  layer and emitting layer, as well as by the features of their dynamics. During a maximal rise of 557.7 nm airglow its spatial inhomogeneity, registered by the CCD imager in a continuum, was observed.

The possible contribution of the excitation mechanism of O(<sup>1</sup>S) level due to electron –  $E_s$  layer collisions in intensification of 557.7 nm airglow during stratospheric warming is discussed.