

А.В. Михалев, И.В. Медведева

## Сезонный ход эмиссии верхней атмосферы в линии атомарного кислорода 558 нм

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

Поступила в редакцию 10.07.2002 г.

По результатам наблюдений собственного свечения верхней атмосферы исследуется сезонный ход эмиссии верхней атмосферы в линии атомарного кислорода на длине волны 558 нм [OI] в регионе Восточной Сибири (52° с.ш., 103° в.д.). Отмечается качественное совпадение с сезонными вариациями эмиссии 558 нм, полученными в предшествующие десятилетия на других среднеширотных станциях, а также с модельными аппроксимациями. Рассматриваются количественные отличия сезонного хода эмиссии 558 нм для региона Восточной Сибири, заключающиеся в более выраженном осеннем максимуме и больших значениях среднемесячных интенсивностей эмиссии 558 нм в зимние месяцы (декабрь–январь). Анализ причин и явлений, формирующих сезонный ход эмиссии 558 нм, и сопоставление с динамикой ветрового режима верхней мезосферы – нижней термосферы, а также стратосферными потеплениями в регионе Восточной Сибири позволяют предположить существование региональных (долготных) особенностей в сезонном ходе эмиссии 558 нм.

### Введение

Зеленая линия атомарного кислорода [OI] 558 нм является самой яркой дискретной эмиссией в видимой области спектра в ночном свечении среднеширотной верхней атмосферы. Одной из важных характеристик этой эмиссии является выраженный сезонный ход, который отображает регулярные динамические процессы в верхней атмосфере и, в частности, вариации распределений температуры и состава мезосферы и нижней термосферы. Сезонный ход эмиссии 558 нм в средних широтах был экспериментально хорошо исследован уже к 60–70 гг. прошлого века [1], что позволило, используя эти данные, перейти к созданию эмпирических моделей вариаций этой эмиссии [2, 3].

Между тем в последние годы появляются многочисленные публикации (см., например, [4, 5]), свидетельствующие о многолетних вариациях температуры и плотности термосферы, температурного режима (в частности, увеличение амплитуд годовых и полугодовых колебаний температуры в мезосфере [4]), других характеристик [6] верхней атмосферы за последние десятилетия. Многолетние изменения отмечаются и в среднегодовых значениях интенсивностей рассматриваемой эмиссии 558 нм, для которой приводятся значения положительного линейного тренда в пределах 0,08 – 0,6% в год [2]. Это позволяет ставить вопрос о возможных изменениях и в других характеристиках этой и других эмиссий верхней атмосферы и о проведении дополнительных исследований.

В настоящей статье представлены результаты исследования сезонного хода эмиссии 558 нм, полученного на основе данных наблюдений собственного свечения верхней атмосферы в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д., Восточная Сибирь) в 1991–1993 и 1997–2001 гг. Следует

отметить, что до этого времени регулярные исследования свечения верхней атмосферы в регионе Восточной Сибири не проводились, что может представлять дополнительный интерес в связи с возможными особенностями региона наблюдения [7].

### Аппаратура и методика наблюдений

В 1991–1993 гг. измерения собственного оптического излучения верхней атмосферы проводились с выделением излучения атомарного кислорода [OI] 558 и 630 нм с помощью двухканального зенитного фотометра с интерференционными качающимися светофильтрами ( $\Delta\lambda_{1/2} \sim 1-2$  нм). В 1997–2001 гг., кроме измерений излучения в линиях 558 и 630 нм, в отдельные периоды регистрировалось излучение в ближней инфракрасной (720–830 нм) и ультрафиолетовой (360–410 нм) областях спектра. Измерения в период 1997–2001 гг. осуществлялись четырехканальным зенитным фотометром с регистрацией на ЭВМ IBM PC с временным усреднением  $\sim 12$  с. Угловые поля зрения фотометров составляли 4–5°. Абсолютная калибровка измерительных трактов аппаратуры осуществлялась в отдельные периоды по эталонным звездам и в дальнейшем контролировалась с помощью опорных световых источников. Наблюдения проводились, как правило, в безлунные ночи в течение 1–2 нед в месяц, в основном в осенне-зимне-весенний период.

### Результаты наблюдений и обсуждение

В таблице приведена статистика количества дней наблюдений эмиссии 558 нм по годам. Общее число дней наблюдений, используемых для исследования сезонного хода эмиссии 558 нм, за указанный период составило 397.

Распределение количества дней наблюдения эмиссии 558 нм по годам

Год	1991	1992	1993	1997	1998	1999	2000	2001
Количество дней наблюдения	24	28	11	16	54	68	120	76

На рис. 1 приведены данные средних ночных интенсивностей эмиссии 558 нм в зените (точки) в зависимости от дня года для периодов 1991–1993 и 1997–2001 гг. по данным Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН. Там же приведена кривая сезонного хода эмиссии 558 нм, полученная усреднением по месяцам средних ночных значений эмиссий 558 нм за указанные периоды.

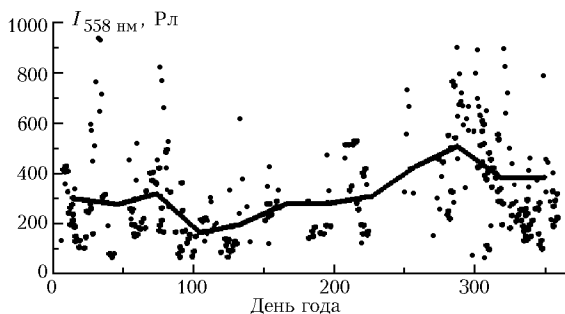


Рис. 1. Средние ночные интенсивности  $I$  эмиссии 558 нм

Известно [1, 8], что в средних широтах интенсивность эмиссии 558 нм характеризуется сезонным ходом, при котором отмечаются максимумы в периоды равноденствий, в феврале–марте и октябре, и летом в июне, при этом амплитуда октябрьского максимума наибольшая. Таков характер сезонного хода для большинства среднеширотных станций в диапазоне 35–50° с.ш. Отличия заключаются в средних годовых интенсивностях и величинах максимумов эмиссии 558 нм. Это позволяет говорить о качественном совпадении полученного сезонного хода эмиссии 558 нм с данными измерений в других регионах. Для выявления возможных особенностей сезонного хода эмиссии 558 нм в исследуемом регионе представляется целесообразным его сопоставление с существующими моделями сезонного хода. На рис. 2 показано сравнение среднемесячных интенсивностей эмиссии 558 нм по результатам наблюдений в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН с эмпирической моделью сезонного хода эмиссии 558 нм по данным работы [2] и с аппроксимацией сезонного хода этой эмиссии согласно работе [3].

В расчетах по эмпирическим моделям учитывались поправки для среднегодовых интенсивностей эмиссии 558 нм на широту Иркутска, многолетние тренды и солнечную активность. Были проведены расчеты для каждого года измерений для разных уровней солнечной активности и многолетнего тренда. На рис. 2 представлены усредненные графики модельных расчетов за 1991–1993, 1997–2001 гг.

Средняя за анализируемый период интенсивность эмиссии 558 нм по экспериментальным данным Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН составила 336 Рл (Рэлей), по расчетам по эмпирической модели [2] – 277 Рл, по эмпирической модели [3] – 280 Рл.

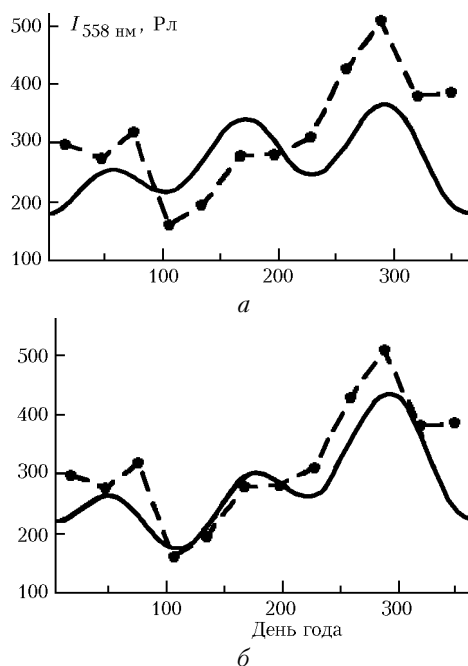


Рис. 2. Сезонный ход эмиссии 558 нм по данным Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (штриховые кривые) и эмпирическим модельным аппроксимациям (сплошные линии) [2] (а) и [3] (б)

Сопоставление кривых на рис. 2 позволяет отметить качественное совпадение анализируемых результатов наблюдений и модельных расчетов. Между тем можно отметить некоторые количественные отличия в сезонном ходе эмиссии 558 нм, полученном по данным Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, заключающиеся в более выраженных осеннем и весеннем минимумах (только по отношению к расчетам по модели [2]), а также в более высоких средних значениях интенсивностей эмиссии 558 нм в зимние месяцы (декабрь–январь). По нашему мнению, полученный по экспериментальным данным в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН сезонный ход эмиссии 558 нм лучше соответствует модельным аппроксимациям сезонного хода этой эмиссии, представленным в работе [3]. Возможно, это связано с тем, что в них, в отличие от работы [2], учитываются широтные поправки на амплитуды основных гармоник, аппроксимирующих сезонный ход, а также фазу годовой гармоник.

Интерпретация отмеченных выше отличий в сезонном ходе требует детального понимания процессов и явлений в верхней атмосфере Земли, определяющих интенсивность эмиссии 558 нм, что, по мнению авторов, в настоящее время еще не достигнуто. Спектральный анализ сезонного хода эмиссии 558 нм позволяет выделить несколько его временных гармоник. Интенсивность эмиссии 558 нм в течение года испытывает колебания с периодом, равным году, и сравнимые

с ним по амплитуде колебания с периодом в полгода, а также заметные колебания с периодом в 4 мес [1–3, 8]. Между тем известно, что многие параметры верхней атмосферы, включая температуру и плотности атмосферных составляющих, испытывают годовые и полугодовые вариации, которые связаны с сезонными пространственно-временными вариациями состояния мезосферы и нижней термосферы.

Среди различных причин, обуславливающих особенности сезонного хода эмиссии 558 нм, отмечают следующие: полугодовые вариации атмосферной плотности [9, 10] и преобладающих ветров на высотах 85–105 км [11], вариации диссипации суточных приливов и гравитационных волн [12], меридиональный перенос кислорода [13, 14], меридиональную циркуляцию, вертикальные ветры и диффузию [15], реверс зонального ветра [16], сезонные вариации температуры мезосферы и нижней термосферы и другие причины.

В настоящей работе обратим внимание только на два типа явлений, возможно, приводящих к отмеченным особенностям сезонного хода эмиссии 558 нм. Первое явление связано с ветровым режимом верхней мезосферы – нижней термосферы, область высот которой совпадает с высотами высвечивания эмиссии 558 нм. В работе [17] на большом статистическом материале исследуется сезонный ход среднемесячных значений горизонтальных ветров в двух долготно разнесенных географических пунктах (52° с.ш., 102° в.д. и 52° с.ш., 15° в.д.), один из которых практически совпадает с расположением пункта проведения оптических наблюдений (52° с.ш., 103° в.д.). Измерения проводились методом разнесенного приема сигналов длинноволновых радиостанций (метод D1) и охватывают 20-летний период с 1975 по 1995 г. В работе анализируются преобладающие зональные и меридиональные ветры и скорости полусуточного зонального и меридионального приливов для ночного периода времени, когда осуществляются и оптические наблюдения свечения атмосферы.

Согласно [17] для ветрового режима верхней мезосферы–нижней термосферы характерны сезонные перестройки зональной и меридиональной циркуляции. На рис. 3 вместе с сезонным ходом эмиссии 558 нм, вычисленным по экспериментальным данным Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (рис. 3, в), приведены данные сезонного хода среднемесячных значений скоростей полусуточного зонального прилива (рис. 3, а) и преобладающего меридионального ветра (рис. 3, б). Сопоставление кривых на рис. 3 позволяет отметить совпадение сроков весенней и осенней перестройки ветрового режима и максимумов в сезонном ходе эмиссии 558 нм.

Наибольший коэффициент корреляции (~ 0,73) сезонного хода эмиссии 558 нм получен для преобладающего меридионального ветра. Это, как и отмеченные выше работы [11–16], позволяет предположить, что сезонный ход эмиссии 558 нм может быть связан с динамическим ветровым режимом этой области. Для нас в этом случае важен еще один результат работы [17], полученный для двух разнесенных по дол-

готе и расположенных на одной географической широте пунктов наблюдения – в России (52° с.ш., 102° в.д.) и в Германии (52° с.ш., 15° в.д.). Для этих двух пунктов выявлены долготные (региональные) различия параметров ветрового режима. В частности, осенний минимум скорости зонального ветра в Сибири наступает раньше, чем в Европе, а весенняя перестройка циркуляции с реверсом ветра отмечается

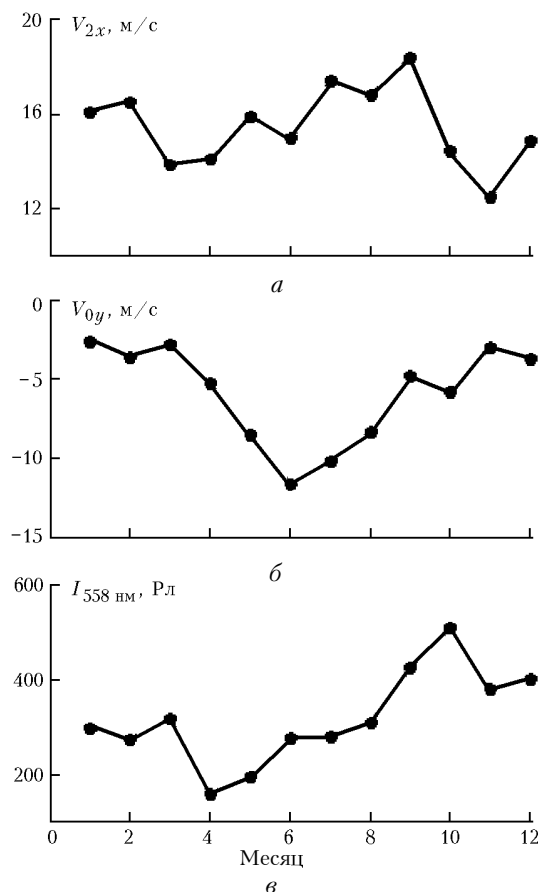


Рис. 3. Сезонный ход среднемесячных значений скоростей полусуточного зонального прилива (а), преобладающего меридионального ветра (б) [17] и эмиссии 558 нм (в)

только в Европе. Это может, с учетом сказанного выше, приводить к существованию долготных (или региональных) отличий в сезонном ходе эмиссии 558 нм, которые не учитываются в модельных аппроксимациях работ [2, 3] и могут быть причиной более выраженного осеннего максимума сезонного хода эмиссии 558 нм, представленного в настоящей статье.

Следует сделать еще одно замечание. Осенний максимум в сезонном ходе эмиссии 558 нм формируется в основном годовой и полугодовой гармониками [1–3]. В работе [4] приводятся экспериментальные указания на «значительное, до 2 раз» увеличение амплитуд годовых и полугодовых колебаний температуры в мезосфере в последнее десятилетие, по сравнению с 70-ми гг., когда был получен основной массив данных по вариациям эмиссии 558 нм, который использовался для построения эмпирических моделей в работах [2, 3]. В свою очередь, согласно [8] температура

на высотах мезосферы определяет скорости реакций возбуждения и релаксации атомарного кислорода в состоянии  $^1S$ , ответственного за излучение линии 558 нм. Если результаты работы [4] справедливы и найдут дальнейшее подтверждение, то необходимы оценка вклада температурных изменений на высотах высвечивания эмиссии 558 нм в ее интенсивность и, при необходимости, их учет в эмпирических моделях вариаций эмиссии 558 нм.

Согласно [18] и другим работам одной из причин, приводящих к нарушению регулярных вариаций излучения ночной верхней атмосферы, могут являться стратосферные потепления. Зимние стратосферные потепления характеризуются внезапными мощными возмущениями зональной и меридиональной циркуляций в зимней стратосфере, в результате которых возникают аномальное нагревание стратосферы и активизация вертикальной циркуляции. При сильных стратосферных потеплениях возмущениями охватывается большой диапазон высот атмосферы от поверхности Земли до верхней мезосферы – нижней термосферы и ионосферной  $F$ -области. В настоящее время отсутствуют общепринятые модели, количественно связывающие характеристики стратосферных потеплений с уровнями возмущений интенсивностей эмиссий верхней атмосферы в эти периоды. Обычно отмечается, что в периоды стратосферных потеплений интенсивности эмиссий сумеречного и ночного излучения верхней атмосферы испытывают колебания с амплитудой до 40–70% в сумерки и до 20% ночью. В отдельных случаях отмечалось увеличение интенсивностей эмиссии атомарного кислорода 558 нм до 100%, которое связывалось с мощными стратосферными потеплениями.

Нами в работе [7] уже указывалось на аномально высокие значения интенсивности эмиссии 558 нм в период возникновения и развития стратосферного потепления в регионе Восточной Сибири в январе 1998 г.

Повышенные значения эмиссии 558 нм в январские и декабрьские месяцы в 1991–1993 и 1997–2001 гг., зарегистрированные в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, в основном, приходились на периоды возникновения и развития стратосферных потеплений в регионе Восточной Сибири. Известно, что стратосферные потепления наблюдаются почти каждую зиму в основном в северном полушарии и для них характерна географическая неравномерность распределения. На рис. 4 для примера показано распределение ежедневных данных областей локализации очагов стратосферных потеплений (координаты максимальных температур) для зимы 1999/2000 г. (декабрь–март). Хорошо видно, что их концентрация в Азиатском регионе и, в частности, в месте локализации Геофизической обсерватории (на рис. 4 выделена квадратиком) велика. По-видимому, частые стратосферные потепления в регионе Восточной Сибири могут привести к увеличению среднемесячных значений интенсивности эмиссии 558 нм в зимние месяцы по сравнению с интенсивностями, характерными для других среднеширотных станций.

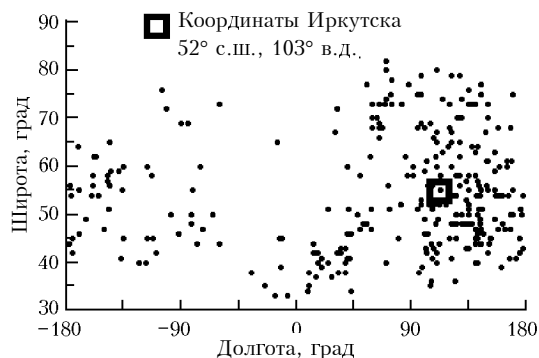


Рис. 4. Распределение локализации очагов стратосферных потеплений, зима 1999/2000 г.

### Заключение

Полученный сезонный ход эмиссии верхней атмосферы в линии атомарного кислорода 558 нм по результатам наблюдений в регионе Восточной Сибири в 1991–1993 и 1997–2001 гг. качественно совпадает с сезонными вариациями эмиссии 558 нм, полученными в предшествующие десятилетия на других среднеширотных станциях, и модельными аппроксимациями.

Количественные отличия сезонного хода эмиссии 558 нм, полученного для региона Восточной Сибири, заключаются в более выраженном осеннем максимуме и больших значениях среднемесячных интенсивностей эмиссии 558 нм в зимние месяцы (декабрь–январь).

Анализ причин и явлений, формирующих сезонный ход эмиссии 558 нм, и сопоставление с динамикой ветрового режима верхней мезосферы–нижней термосферы, а также стратосферными потеплениями в регионе Восточной Сибири позволяют предположить существование региональных (долготных) особенностей в сезонном ходе эмиссии 558 нм. Существует возможность проявления долгопериодных вариаций или трендов в сезонном ходе эмиссии 558 нм, связанных с изменением термического режима мезосферы в последние десятилетия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ – грант ведущих научных школ Российской Федерации № 00-15-98509. Один из авторов пользовался поддержкой INTAS (грант 00-189).

1. Fukuyama K. Airglow variations and dynamics in the lower thermosphere and upper mesosphere – II. Seasonal and long-term variations // J. Atmos. and Terr. Phys. 1977. V. 39. N 1. P. 1–14.
2. Семенов А.И., Шефов Н.Н. Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм в ночное время. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрон. 1997. Т. 37. № 2. С. 81–90.
3. Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М., Шефов Н.Н. Закономерности вариаций эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм // Геомагнетизм и аэрон. 2000. Т. 40. № 6. С. 107–111.
4. Лысенко Е.В., Нелидова Г.Г., Простова А.М. Изменение термического режима страто- и мезосферы в течение последнего 30-летия. II. Эволюция годовых и полугодовых колебаний температуры // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 1997. Т. 33. № 2. С. 250–257.

5. *Лысенко Е.В., Перов С.П., Семенов А.И., Шефов Н.Н., Суходоев В.А., Гвишивили Г.В., Лещенко Л.Н.* Многолетние тренды среднегодовой температуры на высотах 25–110 км // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1999. Т. 35. № 4. С. 435–443.
6. *Gavrilov N.M., Manson A.H., Meek C.E.* Climatological monthly characteristics of middle atmosphere gravity waves (10 min – 10 h) during 1979–1993 at Saskatoon // Ann. Geophysicae. 1995. V. 13. N 3. P. 285–295.
7. *Mikhalev A.V., Medvedeva I.V., Beletsky A.B., Kazimirovsky E.S.* An Investigation of the Upper Atmospheric Optical Radiation in the Line of Atomic Oxygen 557.7 nm in East Siberia // J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys. 2001. V. 63. № 9. P. 865–868.
8. *Фищикова Л.М.* Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 270 с.
9. *Cook G.E.* The semi-annual variation in the upper atmosphere // Ann. Geophys. 1969. V. 25. № 2. P. 451–469.
10. *Groves G.V.* Annual and semiannual zonal wind components and corresponding temperature and density variations, 60–130 km // Planet. and Space Sci. 1972. V. 20. № 12. P. 2099–2112.
11. *Kochanski A.* Semiannual variation at the base of the thermosphere // Mon. Weather Rev. 1972. V. 100. № 3. P. 222–234.
12. *Kulkarni P.V.* Covariation of 6300 Å and 5577 Å emissions in tropical night airglow and the emission of 5577 Å from the F-region // Ann. Geophys. 1974. V. 30. № 2. P. 291–300.
13. *Johnson F.S., Gottlieb B.* Atomic oxygen transport in the thermosphere // Planet. and Space Sci. 1973. V. 21. № 6. P. 1001–1009.
14. *Donahue T.M., Guenther B., Thomas R.J.* Spatial and temporal behavior of atomic oxygen determined by Ogo 6 airglow observations // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. № 13. P. 1959–1964.
15. *Angelats C.M., Forbes J.M.* Dynamical influences on atomic oxygen and 5577 Å emission rates in the lower thermosphere // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. № 4. P. 461–464.
16. *Shiokawa K., Kiyama Y.* A search for the springtime transition of lower thermospheric atomic oxygen using long-term midlatitude airglow data // J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys. 2000. V. 62. N 13. P. 1215–1219.
17. *Kazimirovsky E.S., Vergasova G.V.* The non-zonal effect in the dynamical structure of the midlatitude MLT-region // Adv. Space Res. 2001. V. 27. № 10. P. 1673–1678.
18. *Fukuyama K.* Airglow variations and dynamics in the lower thermosphere and upper mesosphere – III. Variations during stratospheric warming events // J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys. 1977. V. 39. N 3. P. 317–331.

*A.V. Mikhalev, I.V. Medvedeva.* **Seasonal behavior of emission from the upper atmosphere in 558-nm line of atomic oxygen.**

Observations of airglow in the upper atmosphere are used to study the seasonal behavior of emission from the upper atmosphere in the 558-nm line of atomic oxygen [OI] in Eastern Siberia (52° N, 103° E). It is noted that seasonal variations of emission at 558 nm agree qualitatively with the data obtained in previous decades at other mid-litudinal stations and with model approximations. Features peculiar for Eastern Siberia, namely, more pronounced autumn peak and high winter (December – January) values are considered. Analysis of causes and phenomena forming the seasonal behavior of emission at 558 nm and comparison with the wind dynamics in the upper mesosphere – lower thermosphere, as well as stratospheric warmings in Eastern Siberia suggest the existence of regional (longitudinal) peculiarities in the seasonal behavior of emission at 558 nm.