

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 550.338.8

Особенности сезонного хода атмосферной эмиссии [OI] 557,7 нм

А.В. Михалев*

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

Поступила в редакцию 14.12.2016 г.

По результатам многолетних наблюдений собственного излучения верхней атмосферы Земли в Восточной Сибири исследуются особенности сезонного хода атмосферной эмиссии атомарного кислорода [OI] 557,7 нм. Отмечается качественное подобие сезонным вариациям эмиссии 557,7 нм, полученным в предшествующие десятилетия на других среднеширотных станциях Северного полушария. Некоторые отличия заключаются в менее выраженном летнем максимуме и существенно более низких значениях интенсивности эмиссии 557,7 нм в апреле и последующие три месяца. Значимые коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями интенсивности эмиссии 557,7 нм и индексами солнечной активности $F_{10.7}$ получены только для осенних и зимних месяцев. Рассматриваются возможные причины и явления, формирующие сезонный ход атмосферной эмиссии 557,7 нм. В работе использовались данные наблюдений, выполненные в Геофизической обсерватории ИСЗФ (52° с.ш., 103° в.д.) в 1997–2016 гг.

Ключевые слова: свечение атмосферы, эмиссия 557,7 нм, сезонный ход, солнечная активность; airglow, 557.7 nm emission, seasonal variations, solar activity.

Введение

Эмиссия атомарного кислорода [OI] 557,7 нм является одной из самых ярких дискретных линий в собственном излучении верхней атмосферы Земли в видимом диапазоне спектра. Она возникает на высотах ~85–115 км и является следствием реакций рекомбинации атомарного кислорода. В силу своего расположения в интервале высот, охватывающем мезопаузу и нижнюю термосферу, эмиссия 557,7 нм является уникальным параметром для понимания динамики атмосферы различных временных масштабов на высотах ее высвечивания [1]. Исторически это первая эмиссия, обнаруженная еще в начале прошлого века в излучении верхней атмосферы, что обусловило достаточно полное исследование большинства ее характеристик к настоящему времени, включая суточные, сезонные, межгодовые и широтно-долготные вариации, зависимость от солнечной активности и т.д. [2]. Между тем отдельные вопросы вариабельности некоторых характеристик этой эмиссии, включая морфологию и физическую интерпретацию, остались решенными не до конца. В частности это касается и сезонного хода (СХ) эмиссии [OI] 557,7 нм. Считается, что вариабельность мезосферных эмиссий имеет особое значение в силу возможного проявления в них крупномасштабной циркуляции на этих высотах [3]. В классической работе [4] был показан разный СХ эмиссии [OI] 557,7 нм для станций, расположенных в различных широтах.

В работах [5, 6] были также отмечены отличия в СХ эмиссии [OI] 557,7 в зимние месяцы на двух среднеширотных станциях, расположенных в близких долготных зонах. Важную роль играют и наблюдаемые в последние десятилетия климатические изменения, которые коснулись в том числе параметров верхней атмосферы, включая собственное излучение атмосферы [2]. Последнее обстоятельство предполагает выяснение вопроса стабильности (или изменчивости) основных характеристик эмиссии 557,7 нм, включая СХ, в различные фазы наблюдаемых климатических изменений.

В настоящей работе представлены результаты исследования СХ атмосферной эмиссии [OI] 557,7 нм за 20-летний период (1997–2016 гг.), охватывающий два последних солнечных цикла. Исследования основаны на данных наблюдений, выполненных в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН, расположенной в Восточной Сибири (Тункинская долина, Горы, 52° с.ш., 103° в.д.).

Аппаратура и методика наблюдений

Наблюдения эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм проводились в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН с помощью зенитных фотометров (1989–1993 и 1997–2010 гг.) и спектрометра (2011–2016 гг.) с низким спектральным разрешением на базе спектрографа ИСП-51 и цветной ПЗС-матрицы SONY ICX285AQ (камера Видеоскан-285, разработка НПО «Видеоскан», <http://videoscan.ru/>). Для выделения эмиссионных линий

* Александр Васильевич Михалев (mikhalev@iszf.irk.ru).

в зенитных фотометрах использовались интерференционные качающиеся светофильтры ($\Delta\lambda_{1/2} \sim 1-2$ нм). Угловое поле зрения каналов фотометра составляло $\sim 4-5^\circ$. Абсолютная калибровка измерительных трактов аппаратуры осуществлялась в отдельные периоды по эталонным звездам и впоследствии контролировалась с помощью калибраторов – стабилизированных источников света. Характеристики спектрометра представлены на сайте atmos.iszf.irk.ru/data/spectr/. До 2012 г. наблюдения проводились в ночное время в течение 1–2 недель близко к новолунию, а с апреля 2012 г. – каждую ночь. Общее количество ночей наблюдений за указанный период составило более 3000.

Результаты наблюдений и обсуждение

В табл. 1 представлены среднемесячные значения интенсивности эмиссии [OI] 557,7 нм ($I_{557,7}^m$, в рэлях), полученные в ГФО ИСЗФ СО РАН (Торы) в 1997–2016 гг. и используемые в настоящей работе. Прочерки означают отсутствие наблюдений в указанные месяцы.

Общий вид сезонного хода и его особенности. Для эмиссии [OI] 557,7 нм в средних широтах характерен выраженный сезонный ход с тремя максимумами около равноденствий в феврале–марте и октябре, а также в июне. При этом амплитуда октябрьского максимума, как правило, наибольшая. К низким широтам летний максимум постепенно исчезает, а амплитуды весеннего и осеннего максимумов становятся почти равными [7]. В работе [8] отмечается, что наличие трех отчетливых максимумов в СХ эмиссии [OI] 557,7 нм существенно отличается его от поведения других эмиссий мезопаузы – OH и Na. При этом, несмотря на сохранение общей

тенденции сезонного хода эмиссии [OI] 557,7 нм, для конкретных среднеширотных станций можно отметить и индивидуальные особенности. Они заключаются в соотношении амплитуд наблюдаемых среднемесячных максимумов и минимумов [4].

На рис. 1 приведен средний сезонный ход интенсивности эмиссии [OI] 557,7 нм за 1997–2016 гг. (23-й и 24-й солнечные циклы), полученный в ГФО ИСЗФ СО РАН. Для сравнения на этом же рисунке приводятся СХ для среднеширотных станций Абастумани (42° с.ш., 43° в.д.) [9] и Верхний Прованс (44° с.ш., 06° в.д.) [4] в 1957–1970 гг. Этот период соответствует интервалу времени между двумя максимумами (включая сами максимумы) 19-го и 20-го циклов солнечной активности.

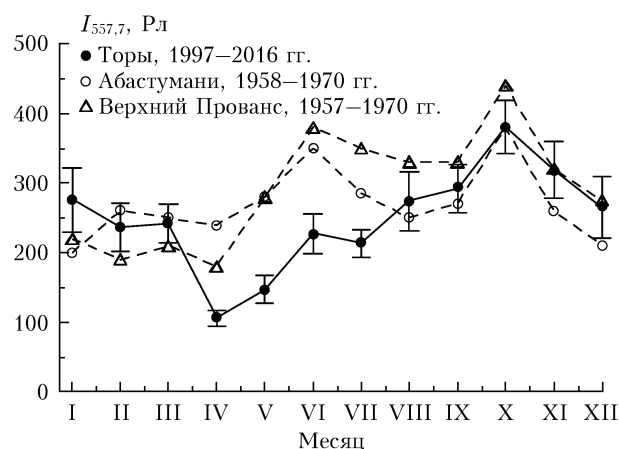


Рис. 1. Сезонный ход эмиссии 557,7 нм. Сплошная линия – данные настоящей работы, штриховая линия (кружки) – данные работы [9], штриховая линия (треугольники) – данные работы [4]. Вертикальными линиями показаны стандартные отклонения от среднего

Таблица 1

Среднемесячные значения интенсивности эмиссии 557,7 нм (в рэлях)

Год	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1997	–	–	–	–	–	–	–	296	–	456	433	306
1998	641	458	387	205	–	–	–	701	–	608	550	364
1999	173	99	373	–	130	–	–	196	–	650	412	151
2000	440	279	207	121	152	260	334	391	439	480	200	315
2001	264	215	201	88	227	–	239	–	379	411	364	686
2002	641	611	438	142	177	396	267	395	391	–	523	–
2003	–	217	255	–	–	–	–	–	–	390	678	681
2004	357	415	334	130	–	296	–	278	237	334	244	213
2005	–	–	316	188	124	254	290	358	349	354	304	169
2006	76	122	144	91	–	–	234	278	161	297	155	145
2007	176	176	148	47	83	204	140	139	161	105	105	35
2008	112	102	90	61	40	83	134	96	64	140	49	86
2009	81	85	135	50	–	–	–	–	–	–	87	141
2010	68	97	87	43	–	–	–	–	–	–	–	–
2011	–	–	–	–	–	–	–	–	516	584	495	232
2012	447	276	430	109	163	182	121	155	328	396	296	158
2013	248	163	215	103	255	290	217	181	229	293	242	300
2014	297	289	263	114	192	184	167	145	302	324	256	263
2015	166	153	81	80	67	124	202	224	240	266	330	260
2016	220	265	241	123	249	375	305	211	179	–	–	–

Попытки интерпретации сезонного хода эмиссии [OI] 557,7 нм предпринимаются достаточно давно (см., например, [10]). В настоящее время наблюдаемые особенности СХ и наличие трех максимумов связывают с глобальной циркуляцией атмосферы на высотах мезосферы и крупномасштабным переносом атомарного кислорода в верхних слоях атмосферы. В пользу этого может говорить и совпадение моментов смены направления циркуляции на мезосферных высотах [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/strat-trop/] с максимумами эмиссии [OI] 557,7 нм в периоды равноденствий. Особую роль отводят вертикальным движениям слоя кислорода и температурным вариациям на высотах свечения эмиссии [OI] 557,7 нм [3, 9], позволяющим, в частности, интерпретировать появление летнего максимума в СХ эмиссии [OI] 557,7 нм [7].

Так, в работе [11] отмечается, что вертикальная адвекция, связанная с приливами и крупномасштабной циркуляцией в мезосфере, играет важную роль в сезонных вариациях эмиссии [OI] 557,7 нм в средних широтах.

В этой связи индивидуальные особенности СХ эмиссии [OI] 557,7 нм, наблюдаемые на конкретных среднеширотных станциях в различное время, требуют своей дополнительной интерпретации. Для СХ эмиссии [OI] 557,7 нм, полученного по данным наблюдений в Торах и представленного на рис. 1, это, прежде всего, существенно более низкие значения $I_{557,7}^M$ в период весеннего минимума (апрель) и последующих трех месяцев по сравнению со значениями соответствующих месяцев, полученными на среднеширотных станциях Абастумани и Верхний Прованс [4], отобранными по принципу наибольшего подобия общего вида СХ эмиссии [OI] 557,7 нм. Еще одна особенность СХ рассматриваемой эмиссии для ГФО ИСЗФ, отмечаемая нами ранее в работах [5, 6] для периода высокой солнечной активности в 1997–2001 гг., заключается в более высоких значениях интенсивности в зимние месяцы по сравнению с данными станции Абастумани. На рис. 1 эта особенность практически не выражена (за исключением января). Вероятно, она проявляется только в периоды высокой солнечной активности [12, 13].

Зависимость СХ от солнечной активности. В работе [9] выявлены сезонные вариации зависимости эмиссии атомарного кислорода [OI] 557,7 нм от солнечной активности и высказано предположение, что существенное изменение высотного распределения атомарного кислорода является основной причиной

особенностей сезонных вариаций эмиссий в области мезопаузы. В связи с этим была предпринята попытка сопоставить СХ эмиссии [OI] 557,7 нм для двух солнечных циклов с различными уровнями солнечной активности. Согласно [http://spaceweathernews.com/] 24-й солнечный цикл начался в конце 2008 г. Поэтому все данные наблюдений по среднемесячным значениям эмиссий [OI] 557,7 нм были разделены на две группы: отвечающие наблюдениям в 23-м (1997–2008 гг.) и 24-м (2008–2016 гг.) солнечных циклах. На рис. 2 представлены СХ эмиссии [OI] 557,7 нм для этих двух солнечных циклов, полученных соответственно усреднением за 1997–2008 и 2008–2016 гг.

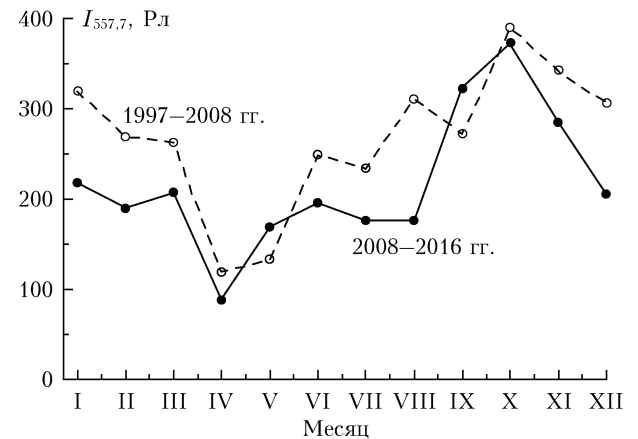


Рис. 2. Сезонный ход эмиссии [OI] 557,7 нм, полученный по данным наблюдений в ГФО ИСЗФ СО РАН в 1997–2008 (23-й цикл) и 2008–2016 гг. (24-цикл)

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции между $I_{557,7}^M$ и индексами солнечной активности $F_{10,7}$ за весь период наблюдений и разделенные по солнечным циклам (N – число пар коррелирующих значений для соответствующего месяца и интервала лет, приведенных в табл. 2). Жирным показаны значимые коэффициенты корреляции по критерию Пирсона.

На рис. 3 приводятся сезонные вариации коэффициентов корреляции между $I_{557,7}^M$ и индексами солнечной активности $F_{10,7}$ по данным настоящей работы (весь период наблюдений) и, для сравнения, по данным работы [9]. За исключением весенних месяцев (март и апрель) отмечается достаточно хорошее совпадение сезонного хода коэффициентов корреляции между $I_{557,7}^M$ и индексами солнечной активности $F_{10,7}$, полученных в разные годы по результатам

Таблица 2
Коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями $I_{557,7}^M$ и индексами солнечной активности $F_{10,7}$

Месяц \ Год	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1997–2016 $N = 16$	0,59	0,55	0,36	0,3	0,39	0,25	0,41	0,4	0,72	0,54	0,52	0,62
1997–2008 (23-й цикл)	0,55	0,51	0,33	0,17	0,77	0,73	0,78	0,44	0,81	0,59	0,5	0,63
2008–2016 (24-й цикл)	0,72	0,71	0,43	0,69	0,46	–0,07	–0,27	0,3	0,82	0,66	0,76	0,88
	(8)	(8)	(8)	(8)	(6)	(6)	(6)	(6)	(6)	(6)	(7)	(6)

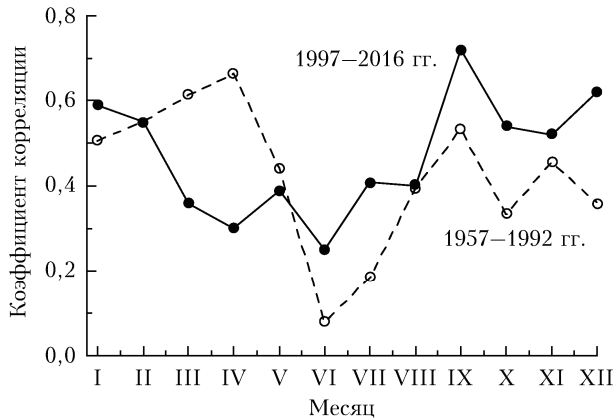


Рис. 3. Коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями интенсивности эмиссии 557,7 нм и индексами солнечной активности $F_{10.7}$. Сплошная линия – данные настоящей работы, штриховая линия – данные [9]

наблюдений в Абастумани и Торах. Наибольшие значения коэффициентов корреляции отмечаются в зимние месяцы и в сентябре. Что касается апреля, здесь можно отметить и существенное различие в абсолютных значениях $I_{557,7}^M$ в СХ этой эмиссии для сравниваемых станций (см. рис. 1). Одним из объяснений этой особенности является возможная незональность циркуляции в верхней мезосфере – нижней термосфере, отмечаемая в некоторых работах (см., например, [14]), обусловленная наличием крупномасштабных волновых структур на рассматриваемых высотах. В пользу этого обстоятельства говорит и непосредственное обнаружение долготных структур в свечении эмиссии [OI] 557,7 нм [15].

Полученные коэффициенты корреляции формально позволяют определить долю вклада солнечной активности в наблюдаемые вариации $I_{557,7}^M$. В случае парной линейной регрессионной модели коэффициент детерминации (в нашем случае доля влияния солнечной активности) для отдельных месяцев достигает 0,3–0,5 (умеренная сила связи) и более. Вероятно, остальная доля вариаций $I_{557,7}^M$ может быть связана с динамикой и возмущениями нижележащей атмосферы.

Вариабельность СХ эмиссии [OI] 557,7 нм. Считается, что существенные флуктуации испытывают как интенсивности эмиссии [OI] 557,7 нм в течение ночи, так и ее среднесуточные и среднесезонные значения. Так, коэффициенты вариаций регулярного ночного хода эмиссии 557,7 нм составляют 0,31 и 0,35 соответственно для летнего и зимнего периодов [7]. На рис. 4 (верхние кривые) приведены средние (сплошная линия), максимальные и минимальные значения (штриховые линии) $I_{557,7}^M$, полученные по данным наблюдений в Торах за анализируемый период. Видно, что наибольшая вариабельность $I_{557,7}^M$ (в абсолютных значениях) наблюдается в зимние месяцы и в августе, наименьшая – в апреле.

Был также построен СХ коэффициента вариаций (K_v) среднемесячной интенсивности эмиссии [OI] 557,7 нм за весь период наблюдений по данным ГФО ИСЗФ СО РАН (см. рис. 4, нижняя кривая).

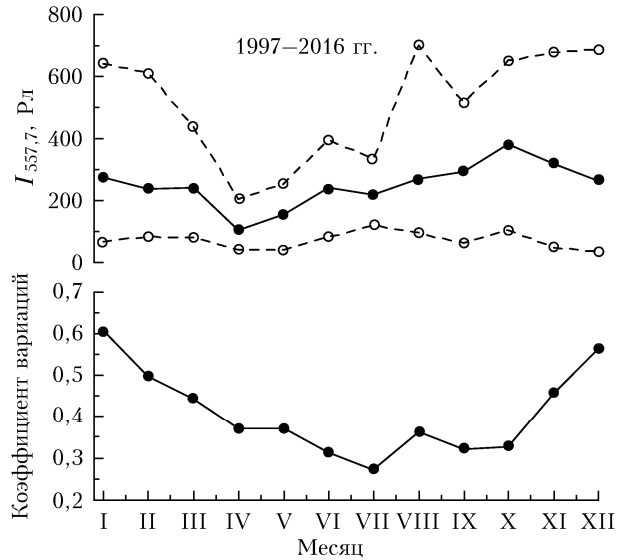


Рис. 4. Вариабельность сезонного хода эмиссии 557,7 нм: максимальные, средние и минимальные значения $I_{557,7}^M$ (верхние кривые); коэффициент вариаций K_v эмиссии 557,7 нм (нижняя кривая)

Найдено, что наибольшие коэффициенты вариаций среднемесячных значений интенсивности эмиссии [OI] 557,7 нм приходятся на зимние месяцы ($K_v \sim 0,5–0,6$), наименьшие – на июнь–июль ($K_v \sim 0,27–0,31$) и сентябрь–октябрь ($K_v \sim 0,32–0,33$). Применяя используемые в статистике показатели вариабельности, можно несколько условно разделить полученные результаты на две группы, составляющие однородные ($K_v \leq 0,33$) и неоднородные ($K_v \geq 0,33$) совокупности. Тогда значения $I_{557,7}^M$ для летних и осенних месяцев с коэффициентами вариаций $K_v \sim 0,27–0,31$ могут быть отнесены к однородным совокупностям, в то время как $I_{557,7}^M$ для зимних месяцев ($K_v \sim 0,5–0,6$) составляют неоднородные совокупности значений. В связи с этим можно предположить, что увеличение K_v в зимние месяцы может быть обусловлено появлением дополнительного источника (наряду с глобальной мезосферной циркуляцией) вариабельности эмиссии [OI] 557,7 нм, в частности связанного с увеличением волновой активности (планетарные и внутренние гравитационные волны) в стратосфере и мезосфере Земли.

Заключение

В настоящей работе на основе многолетних наблюдений выполнены исследования особенностей сезонного атмосферной эмиссии атомарного кислорода [OI] 557,7 нм и получены следующие результаты:

- выявлено качественное подобие СХ эмиссии [OI] 557,7 нм, полученного по наблюдениям в Восточной Сибири в 1997–2016 гг., с СХ этой эмиссии на некоторых среднеширотных станциях Северного полушария во второй половине прошлого века. Отличие заключается в менее выраженном летнем максимуме и экстремально низком значении интенсивности эмиссии 557,7 нм в апреле;

— сопоставление СХ эмиссии [OI] 557,7 нм в 23-м и 24-м солнечных циклах показало большие значения среднемесячных значений эмиссии 557,7 нм в летние и зимние месяцы в 23-м солнечном цикле, с более высоким уровнем солнечной активности, по сравнению с аналогичными месяцами в 24-м солнечном цикле;

— по данным наблюдений в период 1997–2016 гг., значимые коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями интенсивности эмиссии [OI] 557,7 нм и индексами солнечной активности $F_{10.7}$ получены только для осенних и зимних месяцев. Это согласуется с выводами работы [9] о снижении зависимости эмиссии [OI] 557,7 нм от солнечной активности в летние месяцы.

1. *Das Uma, Pan C.J., Sinha H.S.S.* Effects of solar cycle variations on oxygen green line emission rate over Kiso, Japan // *Earth Planets Space*. 2011. V. 63, N 8. P. 941–948.
2. *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю.* Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
3. *Shepherd G.G., Cho Young-Min, Liu G., Shepherd M.G., Roble R.G.* Airglow variability in the context of the global mesospheric circulation // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2006. V. 68, N 17. P. 2000–2011.
4. *Fukuyama K.* Airglow variations and dynamics in the lower thermosphere and upper mesosphere. II. Seasonal and long-term variations // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1977. V. 39, N 1. P. 1–14.
5. *Михалев А.В., Медведева И.В.* Сезонный ход эмиссии верхней атмосферы в линии атомарного кислорода 558 нм // *Оптика атмосф. и океана*. 2002. Т. 15, № 11. С. 993–997.
6. *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.
7. *Фишкова Л.М.* Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 271 с.
8. *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.
9. *Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М., Шефов Н.Н.* Сезонные вариации зависимости эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм от солнечной активности и многолетнего тренда // *Геомагнетизм и аэрон.* 2001. Т. 41, № 4. С. 557–562.
10. *Kyo Yano.* A long-term aspect of the seasonal variation in the nightglow 5577 intensity at middle latitudes // *Planet. Space Sci.* 1967. V. 15, N 6. P. 1091–1093.
11. *Liu Guiping, Shepherd G.G., Roble R.G.* Seasonal variations of the nighttime O(¹S) and OH airglow emission rates at mid-to-high latitudes in the context of the large-scale circulation // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A06302. DOI: 10.1029/2007JA012854.
12. *Михалев А.В.* Вариации атмосферной эмиссии 557,7 нм в период действия стратосферных потеплений в условиях высокой и низкой солнечной активности // *Солнечно-земная физика*. 2010. Вып. 15. С. 127–130.
13. *Mikhalev A.V.* Variations in the 557.7 nm atmospheric emission during stratospheric warming events under conditions of high and low solar activity // *Geomagn. Aeron.* 2010. V. 50, N 8. P. 1021–1024.
14. *Вергасова Г.В., Казимировский Э.С.* Незональность ветрового поля в области верхней мезосферы/нижней термосферы как возможное проявление внешнего воздействия // *Геомагнетизм и аэрон.* 1999. Т. 39, № 6. С. 95–100.
15. *Wang D.Y., Ward W.E., Solheim B.H., Shepherd G.G.* Longitudinal variations of green line emission rates emission rates observed by WINDII at altitudes 90–120 km during 1991–1996 // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2002. V. 64, iss. 8–11. P. 1273–1286.

A.V. Mikhalev. Features of seasonal [OI] 557.7 nm emission variations.

From long-term observations of the upper atmosphere emission in Eastern Siberia, we studied features of seasonal [OI] 557.7 nm emission variations. We found qualitative similarity with seasonal 557.7 nm emission variations obtained from other mid-latitude stations in the Northern hemisphere in previous decades. Among differences are less pronounced annual summer maximum and significantly lower values of 557.7 nm emission intensity in April and the next three months. We found a significant correlation coefficients between the monthly averages of 557.7 nm emission intensity and $F_{10.7}$ solar radio flux index only for autumn and winter months. We discussed possible reasons and mechanisms of the observed 557.7 nm emission variations. We used observations from the Geophysical Observatory of Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS (52° N, 103° E) for 1997–2016.