

УДК 550.388

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА НА ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭМИССИИ 630 нм В СВЕЧЕНИИ НОЧНОГО НЕБА

И.Б. Иевенко, В.Н. Алексеев, С.Г. Парников

EFFECT OF SOLAR ULTRAVIOLET RADIATION ON EXCITATION OF 630 nm NIGHTGLOW EMISSIONS

I.B. Ievenko, V.N. Alekseev, S.G. Parnikov

Хорошо известно, что интенсивность эмиссии 630.0 нм в свечении ночного неба на средних широтах увеличивается больше чем в два раза в периоды максимума активности Солнца. Предполагалось, что это явление обусловлено вариациями интенсивности солнечного ультрафиолетового излучения в циклах солнечной активности [Фишкова, 1983].

В этой работе представлены результаты фотометрических измерений интенсивности эмиссии ночного неба на географической широте 63° на меридиане Якутска (130° E) в 1990–2007 гг. Показана зависимость интенсивности эмиссии 630.0 нм в магнитоспокойные дни от солнечной активности в 22-м и 23-м циклах. Установлено наличие тесной связи интенсивности линии 630.0 нм в ночном небе с интенсивностью солнечного крайнего ультрафиолета (EUV) в 1997–2007 гг. по данным SOHO/SEM с коэффициентом корреляции 0.8–0.9. Тем самым получено экспериментальное подтверждение доминирующей роли солнечного EUV в возбуждении эмиссии 630.0 нм в свечении ночного неба.

It is common knowledge that the 630 nm emission intensity in the night airglow at middle latitudes increases more than twice during solar maximum. This phenomenon was assumed to be caused by variations in intensity of solar ultraviolet radiation during different solar cycles [Fishkova, 1983].

This paper presents results of photometric measurements of the night-sky emission intensity at the latitude of 63°, meridian of Yakutsk (130° E), in 1990–2007. We show dependence of the 630 nm emission intensity under quiet geomagnetic conditions on solar activity during the 22nd and 23rd solar cycles. A close connection between intensity of the nightglow 630 nm line and intensity of the extreme ultraviolet (EUV) solar radiation was established from SOHO/SEM data (1997–2007) with the correlation coefficient 0.8–0.9. Thus, we obtained experimental evidence for the dominant role of the solar EUV in provoking 630 nm nightglow emissions.

Введение

Красные линии атомарного кислорода 630.0 и 636.4 нм (${}^1D-{}^3P_{21}$) являются наиболее интенсивными эмиссиями ночного неба в видимой части спектра в F-области ионосферы. На средних широтах в спокойных геомагнитных условиях основным процессом образования возбужденных атомов O(1D) является диссоциативная рекомбинация ионов молекулярного кислорода O_2^+ и окиси азота NO^+ [Barbier, 1959; 1961; Чемберлен, 1963]. Вследствие большого времени жизни (~110 с) для метастабильного уровня 1D происходит быстрое увеличение скорости дезактивации в нижней термосфере, и на высотах ниже 160 км интенсивность эмиссий 630.0 и 636.4 нм становится незначительной. Механизмы образования возбужденных атомов O(1D) и их дезактивации обуславливают наибольшую объемную интенсивность этих эмиссий в максимуме электронной концентрации слоя F2 ионосферы на высоте 250–270 км. Наличие тесной связи интенсивности эмиссии 630.0 нм с параметрами области F2 впервые отмечено в работе [Barbier, 1959].

Первые многолетние наблюдения Барбье в Верхнем Провансе (44° N, 6° E) показали значительный рост интенсивности красной эмиссии при увеличении солнечной активности в 1953–1960 гг. [Barbier, 1965]. В последующем связь интенсивности эмиссии 630.0 нм с солнечной активностью была подтверждена для четырех солнечных циклов по данным наблюдений в Абастумани (42° N, 43° E) в 1958–1992 гг. [Фишкова, 1983; Гивишвили и др., 1996]. В периоды максимума 20, 21 и 22-го циклов солнечной активности среднегодовая интенсивность красной эмиссии увеличивалась в 2–2.5 раза относительно минимума. Прямая зависимость интенсивности красной эмиссии от уровня солнечной активно-

сти также была получена по результатам наблюдений на среднеширотной станции Звенигород (56° N, 37° E) в 1969–1973 гг. [Трутце, Белявская, 1975]. В работе [Шефов и др., 2006] на основе данных многолетних наблюдений в Абастумани предложены эмпирические соотношения, определяющие корреляционную зависимость среднегодовой интенсивности эмиссии 630.0 нм от интенсивности радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см (индекса $F_{10.7}$) в циклах солнечной активности. Наблюдения красной линии атомарного кислорода в Иркутске (52° N, 103° E) в 1999–2006 гг. также показали сильную зависимость интенсивности этой эмиссии в ночном небе на средних широтах от индекса $F_{10.7}$ на фазе спада 23-го цикла солнечной активности [Михалев и др., 2008].

В низких широтах наблюдения ночной эмиссии 630.0 нм проводились в Бразилии (23° S, 45° W) в 1975–1982 гг. [Sahai et al., 1988]. Возрастание примерно в семь раз среднегодовой интенсивности красной линии во время усиления солнечной активности в 21-м цикле авторы связывают с увеличением электронной концентрации ночного слоя F2 приблизительно в пять раз на широте наблюдений в области экваториальной ионосферной аномалии в этот же период времени.

В этой статье приводятся результаты фотометрических наблюдений эмиссии атомарного кислорода 630.0 нм в свечении ночного неба на относительно высокой географической широте 63° N на меридиане Якутска (130° E) в 1990–2007 гг. Следует отметить, что в долготном секторе американского континента регистрация эмиссий ночного неба на этой параллели практически невозможна вследствие соответствия ее геомагнитной широте ~73° N в авроральной зоне. Полученные данные подтверждают тесную связь красной эмиссии 630.0 нм с

солнечной активностью в 22-м и 23-м циклах. Выполнен анализ зависимости интенсивности красной линии от интенсивности солнечного крайнего ультрафиолета в 23-м цикле.

1. Методика наблюдений и анализа данных

В работе использованы данные регулярных наблюдений эмиссий ночного неба и субаврорального свечения на ст. Маймага (63° N , 130° E ; геомагнитная широта 57° N). Измерения интенсивности эмиссии 630.0 nm [OI], а также полосы 427.8 nm N_2^+ проводились четырехканальным фотометром в магнитном зените станции. Угловое поле зрения каждого канала равно 10° . В термостатированной камере фотометра установлены интерференционные светофильтры с полушириной пропускания 2.0 nm , центрированные на исследуемые эмиссии и континуум в их окрестности. Фотоэлектронные умножители находятся снаружи камеры с фильтрами для естественного охлаждения в условиях низкой температуры окружающего воздуха. Абсолютная энергетическая градуировка фотометра выполнялась методом опорного приемника [Иевенко, 1995]. Во время наблюдений чувствительность четырех каналов контролировалась по встроенному опорному источнику света. Фотометр позволял регистрировать эмиссии в свечении ночного неба с интенсивностью от 2 Рл при отношении сигнал/шум равном 2, с временным разрешением 5 с. Фотометрические наблюдения проводились в безлунные ночи зимних месяцев в условиях хорошей прозрачности атмосферы. На географической широте 63° N с конца апреля по сентябрь ночи становятся белыми.

Для анализа были взяты ночи наблюдений с текущими значениями $K_p \leq 2_0$ и $D_{st} \geq -20 \text{ нТл}$, когда вариации эмиссии 630.0 nm могут быть однозначно вызваны механизмами свечения ночного неба. При значениях $K_p \geq 3-4$ на геомагнитных широтах $56-57^\circ \text{ N}$ обычно возникают среднеширотные красные дуги (SAR-дуги) и усиливаются выпадения энергичных частиц во время суббурь [Иевенко, 1999; Иевенко, Алексеев, 2004; Ievenko et al., 2008]. При отборе материала мы использовали также данные, полученные с помощью меридионального сканирующего фотометра, по эмиссиям 557.7 и 630.0 nm для контроля авроральной активности севернее станции наблюдений. Таким образом было отобрано 158 ночей за период наблюдений с 1990 по 2007 г.

Данные зенитного фотометра с 1990 по 1997 г. записывались в аналоговом виде многоканальным потенциометром КСП-4. С 1998 по 2007 г. параллельно с аналоговой регистрацией проводилась цифровая запись. Для однородности статистического ряда в работе были использованы только аналоговые данные, которые были оцифрованы с 30-минутным шагом в интервале 23–03 ч LT при высоте тени Земли $\geq 500 \text{ км}$. Далее определялось среднее значение для каждой ночи наблюдений. В отличие от средних широт, для 63 -й параллели имеется сильная сезонная зависимость интенсивности красной линии, что обусловлено быстрым уменьшением длительности ночи при переходе от зимних к весенним месяцам. Известно, что скорость возбуждения красной эмис-

сии постепенно падает в течение ночи и ее интенсивность зависит от времени после захода Солнца, поэтому анализ многолетних вариаций эмиссии 630.0 nm был проведен по средним значениям интенсивности для каждого месяца наблюдений отдельно.

2. Вариации интенсивности эмиссии 630.0 nm в циклах солнечной активности

В табл. 1 приведены число ночей наблюдений в магнитоспокойных условиях и соответствующие средние интенсивности эмиссии 630.0 nm для пяти месяцев каждого года за период 1990–2007 гг. В последней колонке указаны также средние интенсивности по годам, изменения которых согласуются с вариациями среднегодовых значений интенсивности красной эмиссии на средних широтах в четырех циклах солнечной активности [Фишкова, 1983; Гивишвили и др., 1996]. Это интенсивности 82–95 Рл в максимумах (1991 и 2002 гг.) и 34–50 Рл в минимумах (1995 и 2007 гг.) солнечной активности. Видно, что наиболее полными являются многолетние ряды данных для февраля и марта.

На рис. 1, а, б, в сопоставлены многолетние вариации интенсивности эмиссии 630.0 nm для этих

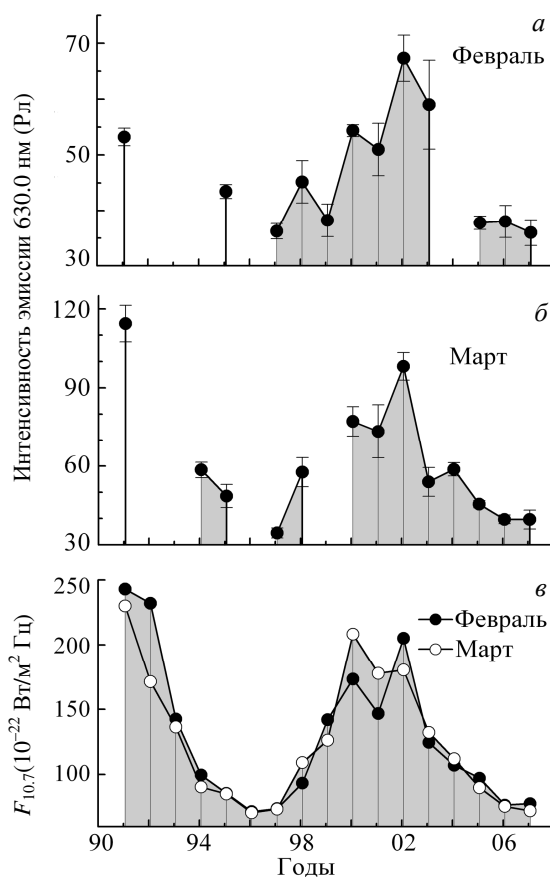


Рис. 1. Многолетние вариации интенсивности эмиссии 630.0 nm в ночном небе на географической широте 63° N и изменение солнечной активности в 1991–2007 гг. Приведены средние значения измеренной интенсивности красной линии при высоте тени $>500 \text{ км}$ в магнитоспокойные дни для февраля (а) и марта (б) в 1991–2007 гг. (указаны стандартные ошибки среднего); среднемесячные значения индекса $F_{10.7}$ для февраля и марта в 22-м и 23-м циклах солнечной активности (в).

Таблица 1

Данные наблюдений эмиссии 630.0 нм в свечении ночного неба на географической широте 63° N на меридиане Якутска (130° E)

Годы	Месяцы										Всего по годам	
	декабрь		январь		февраль		март		апрель			
	<i>N</i>	<i>I</i> _{ср}	<i>N</i>	<i>I</i> _{ср}	<i>N</i>	<i>I</i> _{ср}	<i>N</i>	<i>I</i> _{ср}	<i>N</i>	<i>I</i> _{ср}	<i>N</i> _а	<i>I</i> _{а ср}
1990	10	50.6	2	50							12	50.3
1991			3	50	1	53.2	2	114.4			5	82.2
1992												
1993												
1994							3	58.5			3	58.5
1995					3	43.4	3	48.5	3	56.5	9	49.5
1996												
1997					4	36.2	6	34.5	4	49.2	14	40
1998	1	47.8			3	45	4	57.6	2	60.5	10	54
1999	2	48.3	5	38	4	38					11	41
2000					2	54.4	5	77			7	66
2001			2	43.4	6	51	5	73.3			13	56
2002					5	67.3	7	98	4	119	16	95
2003	3	40.2			2	59	2	54			7	51
2004	3	45					4	59			7	52
2005					3	38	4	45.5	6	60.5	13	48
2006	3	24	6	38	4	38	8	39.6	1	46.2	22	37
2007					6	36	3	39.6			9	34

Примечание: В таблице приведены число ночей наблюдений (N) и средние интенсивности эмиссии 630.0 нм ($I_{\text{ср}}$) в полуночные часы для указанных месяцев в 1990–2007 гг. В последних двух столбцах также указаны сумма ночей наблюдений по годам (N_a) и среднегодовые значения интенсивности ($I_{a \text{ ср}}$).

месяцев с изменением индекса солнечной активности $F_{10.7}$ в 22-м и 23-м циклах. Разная амплитуда вариаций ночного свечения для февраля и марта обусловлена сезонной зависимостью. По редким измерениям с 1991 по 1997 г. можно говорить о выраженной тенденции к значительному уменьшению интенсивности красной линии на фазе спада 22-го цикла солнечной активности. Уменьшение интенсивности произошло в 1.5 и 3.3 раза для февраля и марта соответственно. Для рядов наблюдений в 1997–2007 гг. уже видна тесная связь интенсивности эмиссии 630.0 нм с индексом $F_{10.7}$ в 23-м цикле активности. В данном случае выявлены вариации эмиссии 630.0 нм, синфазные с вариациями солнечной активности на географической широте 63° N.

3. Связь возбуждения эмиссии 630.0 нм с солнечным ультрафиолетом

Интенсивность эмиссии 630.0 нм зависит от уровня ионизации ночного слоя F2, с которым связаны скорости образования и диссоциативной рекомбинации ионов O_2^+ с возникновением возбужденных атомов $O(^1D)$ [Барбье, 1959, 1961; Чемберлен, 1963]. Среднегодовые значения f_oF2 для ночных часов на средних широтах, отражающие уровень ионизации области F2, изменяются также синфазно с циклами солнечной активности [Фишкова, 1983; Гивишвили и др., 1996]. Это дает основание полагать, что многолетние вариации ионизации ночного слоя F2 и, соответственно, интенсивности красной линии обусловлены циклическими изменениями интенсивности ультрафиолетового излучения Солнца [Фишкова, 1983].

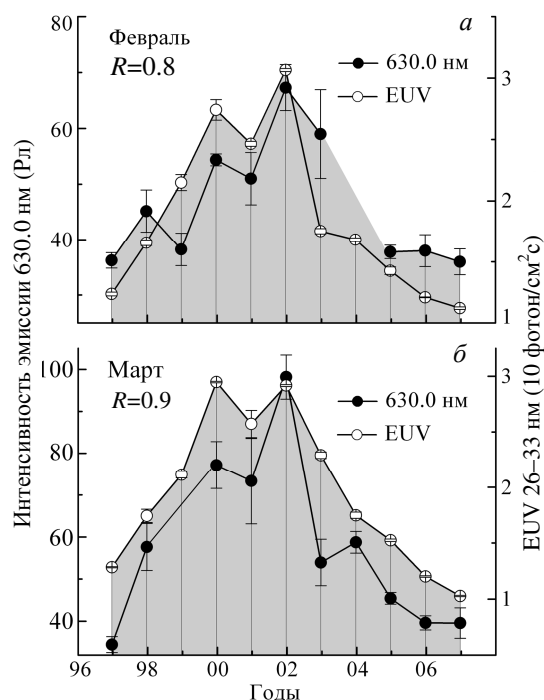


Рис. 2. Вариации интенсивности эмиссии атомарного кислорода 630.0 нм в ночном небе и солнечного крайнего ультрафиолета (EUV) в 1997–2007 гг. Приведены средние значения измеренной интенсивности эмиссии 630.0 нм при высоте тени >500 км, а также средние интенсивности EUV по данным SOHO/SEM для февраля (а) и марта (б) в 23-м цикле солнечной активности. На графике указаны стандартные ошибки среднего. R – коэффициент корреляции между вариациями интенсивности эмиссии 630.0 нм и вариациями EUV.

Таблица 2

Изменения концентрации N_2 , O_2 в 23-м цикле солнечной активности на широте Якутска по эмпирической модели MSIS-86 и соответствующие относительные вариации интенсивности эмиссии 630.0 нм

Годы	Февраль (cm^{-3})		Март (cm^{-3})		Февраль (нормир.)			Март (нормир.)		
	N_2	O_2	N_2	O_2	N_2	O_2	630 нм	N_2	O_2	630 нм
1997	$9.6 \cdot 10^7$	$6.1 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^8$	$6.2 \cdot 10^6$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2001	$3.6 \cdot 10^8$	$1.4 \cdot 10^7$	$2.9 \cdot 10^8$	$1.7 \cdot 10^7$	3.8	2.3	1.0	2.2	2.8	1.6
2002	$4.3 \cdot 10^8$	$2.7 \cdot 10^7$	$5.4 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^7$	4.5	4.4	1.6	4.1	4.0	1.5
2006	$7.0 \cdot 10^7$	$4.0 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^8$	$6.5 \cdot 10^6$	0.7	0.6	0.8	1.1	1.1	1.0
2007	$1.1 \cdot 10^8$	$5.4 \cdot 10^6$	—	—	1.2	0.9	0.8	—	—	—

Примечание: Жирным шрифтом выделены нормированные на 1997 г. концентрации N_2 и O_2 , а также нормированная интенсивность красной линии в годы максимума 23-го цикла.

Мы провели анализ связи интенсивности эмиссии 630.0 нм с вариациями EUV по имеющимся данным для 23-го цикла солнечной активности. Среднесуточные интенсивности EUV в спектральном интервале 26–33 нм за 1997–2007 гг. были взяты из материалов эксперимента CELIAS/SEM на космическом аппарате SOHO. На рис. 2, а, б представлены вариации интенсивности красной линии и EUV как функции времени для февраля и марта за 1997–2007 гг. Средние значения EUV взяты для дней измерения интенсивности красной линии в свечении ночного неба. На графиках изменение эмиссии 630.0 нм во времени происходит синфазно с вариациями EUV с коэффициентами корреляции 0.8 и 0.9 для февраля и марта соответственно. Увеличения интенсивности красной линии в 1.9 раза в феврале и 2.8 раза в марте значительно превышают стандартные ошибки среднего и совпадают с максимумом потока EUV. При этом происходило возрастание потока EUV примерно в три раза. Хорошо выражено и уменьшение интенсивности красной эмиссии ночного неба во время снижения уровня EUV в 2003–2007 гг. Две независимые выборки данных указывают на функциональную линейную зависимость интенсивности эмиссии 630.0 нм от потока EUV в 23-м цикле солнечной активности.

Изменения солнечной активности вызывают также значительные вариации нейтрального состава верхней атмосферы. При диссоциативной рекомбинации скорость образования возбужденных атомов $O(^1D)$ в основном определяется концентрацией молекулярного кислорода O_2 и ионов O^+ (электронной плотностью) в максимуме слоя F2. Скорость объемной эмиссии 630.0 нм зависит от коэффициента дезактивации атомов $O(^1D)$, которая определяется концентрацией нейтральных компонент N_2 и O_2 на высотах F2-области ионосферы [Barbier, 1959; 1961; Чемберлен, 1963; Фишкова, 1983].

Для оценки влияния этого фактора на интенсивность красной линии мы сделали расчет изменения концентрации N_2 и O_2 на широте и долготе ст. Маймага в 23-м цикле солнечной активности по эмпирической модели MSIS-86 [Hedin, 1987]. Вычисления по этой модели были выполнены на сайте Центра данных по солнечной системе, Великобритания (UK Solar System Data Centre). В табл. 2 приведены средние концентрации N_2 и O_2 в интервале высот 250–300 км для локальной полночи в дни наблюдений красной линии в феврале и марте за период 1997–2007 гг. Там же указаны относительные вариации

интенсивности эмиссии 630.0 нм, которые могут быть обусловлены изменением нейтрального состава верхней атмосферы (N_2 и O_2) при фиксированной ионизации. Согласно модели MSIS-86 в годы максимума 23-го цикла было возможно увеличение концентрации N_2 в 2.2–4.5 и O_2 в 2.3–4.4 раза. Такие вариации нейтрального состава в области F2, по нашей оценке, могли вызвать усиление эмиссии 630.0 нм в свечении ночного неба до 1.6 раза. В феврале 2001 г. изменение состава верхней атмосферы не дает усиления красной линии вследствие большего относительного роста концентрации N_2 , определяющей коэффициент дезактивации атомов $O(^1D)$.

Наблюдаемое увеличение интенсивности красной линии в 1.9 раза в феврале и 2.8 раза в марте тесно связано с потоком EUV и не может быть объяснено возможным влиянием вариаций нейтрального состава на возбуждение этой эмиссии. Этот факт, а также закономерная зависимость эмиссии 630.0 нм от ионизации ночного слоя F2 указывают на доминирующую роль солнечного EUV в возбуждении эмиссии 630.0 нм в ночном небе.

Заключение

По данным фотометрических наблюдений на меридиане Якутска (130° E) на географической широте 63° N в магнитоспокойные дни 1990–2007 гг. показана связь интенсивности эмиссии 630.0 нм в свечении ночного неба с солнечной активностью в 22-м и 23-м циклах. Изменение средней интенсивности от 82–95 Рл в максимумах до 34–50 Рл в минимумах солнечной активности согласуется с вариациями среднегодовой интенсивности красной эмиссии на средних широтах в 20–22-м циклах [Фишкова, 1983; Гвишвили и др., 1996].

Выявлена тесная связь интенсивности эмиссии атомного кислорода 630.0 нм в ночном небе с интенсивностью солнечного EUV по данным SOHO/SEM с коэффициентом корреляции 0.8–0.9 в 1997–2007 гг. Две независимые выборки данных для февраля и марта указывают на функциональную линейную зависимость яркости эмиссии 630.0 нм от потока EUV в 23-м цикле солнечной активности. Наблюдаемое увеличение интенсивности красной линии существенно превышает вызываемое влиянием вариаций концентрации O_2 и N_2 по эмпирической модели MSIS-86.

Закономерная зависимость эмиссии 630.0 нм от ионизации ночного слоя F2 обусловлена основным

механизмом возбуждения этой линии вследствие диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов O_2^+ и NO^+ [Barbier, 1959; 1961; Чемберлен, 1963]. В свою очередь, ночная ионизация и, соответственно, интенсивность красной линии связаны с электронной концентрацией дневной F-области ионосферы, которая определяется величиной потока EUV в цикле солнечной активности. По данным космического аппарата SOHO получено экспериментальное подтверждение доминирующего влияния солнечного EUV на возбуждение эмиссии 630.0 нм в свечении ночного неба.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН №16/3 и гранта РФФИ № 09-05-98501-р-Восток_а. Данные по EUV за 1997–2007 гг. были получены с сайта с материалами эксперимента CELIAS/SEM на космическом аппарате SOHO: http://www.usc.edu/dept/space_science/sem_data/sem_data.html. Вычисления по модели MSIS-86 были выполнены на сайте UK Solar System Data Centre: <http://www.wdc.rl.ac.uk/wdcc1/msis.html>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В. Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32, № 3. С. 329–339.
- Иевенко И.Б. Абсолютная энергетическая градуировка спектрофотометров методом опорного приемника: Методическое руководство. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1995. 22 с.
- Иевенко И.Б. Воздействие магнитосферной активности на плазмасферу по наблюдениям диффузного сияния и SAR-дуги // Геомагнетизм и аэронавтика. 1999. Т. 39, № 6. С. 26.
- Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Влияние суббури и бури на динамику SAR-дуги. Статистический анализ // Геомагнетизм и аэронавтика. 2004. Т. 44, № 5. С. 643–654.
- Михалев А.В., Медведева Н.В., Костылева Н.В. Проявление солнечной активности в вариациях атмосферных эмиссий 557.7 и 630 нм в 23-м солнечном цикле // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 2, № 5. С. 425–431.
- Трутце Ю.Л., Белявская В.Д. Красная кислородная эмиссия λ 630 Å и плотность верхней атмосферы // Геомагнетизм и аэронавтика. 1975. Т. 15, № 1. С. 101–104.
- Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 272 с.
- Чемберлен Дж. Физика полярных сияний и излучения атмосферы. М.: ИИЛ, 1963. 777 с.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Юрченко О.Т. Эмпирическая модель вариации эмиссии атомарного кислорода 630.0 нм. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэронавтика. 2006. Т. 46, № 2. С. 250–260.
- Barbier D. Recherches sur de la raie 6300 Å de la luminescence atmosphérique nocturne // Ann. Geophys. 1959. V. 15, N 2. P. 179–217.
- Barbier D. Les variations d'intensité de la raie 6300 Å de la luminescence nocturne // Ann. Geophys. 1961. V. 17, N 4. P. 3–15.
- Barbier D. Variations de l'intensité des principales radiations de la luminescence atmosphérique nocturne avec le cycle solaire // Ann. Geophys. 1965. V. 21, N 3. P. 265–274.
- Hedin A.E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, N A5. P. 4649–4662.
- Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N. Relationship of the diffuse aurora and SAR arc dynamics to substorms and storms // Adv. Space Res. 2008. V. 41/8. P. 1252–1260. doi: 10.1016/j.asr.2007.07.030.
- Sahai Y., Takahashi H., Bittencourt J.A., Sobral J.H.A., Teixeira N.R. Solar cycle and seasonal variations of the low latitude OI 630 nm nightglow // J. Atmos. Terr. Phys. 1988. V. 50, N 2. P. 135–140.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск