

УДК 550.388

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭМИССИИ 630 нм НОЧНОГО НЕБА В 23-ЕМ ЦИКЛЕ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА

© 2011 г. И. Б. Иевенко, В. Н. Алексеев, С. Г. Парников

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

e-mail: ievenko@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 15.05.2010 г.

После доработки 04.10.2010 г.

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 солнечного ультрафиолетового излучения в циклах солнечной активности [Фишкова, 1983].

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

1. 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 F 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-го, 21-го 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 активности также была получена по результатам наблюдений на среднеширотной станции Звенигород (56° N, 37° E) в 1969–1973 гг. [Трутце и 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 $F10.7$) 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 $F10.7$ на спаде 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 в ~7 раз среднегодовой интенсивности красной линии во время усиления солнечной активности в 21-ом цикле авторы связывают с увеличением электронной концентрации ночного слоя $F2$ в ~5 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-ом и 23-ем циклах. Выполнен анализ зависимости интенсивности красной линии от интенсивности солнечного экстремального ультрафиолета в 23-ем цикле.

2. 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 нм [OI], а также полосы 427.8 нм N₂⁺ проводились четырехканальным фотометром в магнитном зените станции. Угловое поле зрения каждого канала равно 10°. В термостатированной камере фотометра установлены интерференционные светофильтры с полушириной пропускания 1.5–2.0 нм, 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-х Рэлей 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 $Kp \leq 2_0$ и $Dst \geq -20$ нТл, когда вариации эмиссии 630.0 нм могут быть однозначно вызваны механизмами свечения ночного неба. При значениях $Kp \geq 3-4$ на геомагнитных широтах 56–57° N обычно возникают среднеширотные красные дуги (SAR-дуги) и усиливаются высыпания энергичных частиц во время суббурь [Иевенко, 1999; Иевенко и Алексеев, 2004; Ievenko et al., 2008]. При

отборе материала мы также использовали данные меридионального сканирующего фотометра в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм для контроля авроральной активности севернее станции наблюдений. Таким образом, было отобрано 158 ночей за период наблюдений 1990–2007 гг.

Данные зенитного фотометра с 1990 по 1997 гг. записывались в аналоговом виде многоканальным потенциометром КСП-4. С 1998 по 2007 гг. 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 локального времени при высоте тени Земли ≥ 500 км. Далее определялось среднее значение для каждой ночи наблюдений. В отличие от наблюдений на средних широтах для 63-ей 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 эмиссии постепенно падает в течение ночи, и ее интенсивность зависит от времени после захода Солнца. Поэтому анализ многолетних вариаций эмиссии 630.0 нм был проведен по средним значениям интенсивности для каждого месяца наблюдений отдельно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА. СВЯЗЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИИ 630.0 НМ С СОЛНЕЧНЫМ УЛЬТРАФИОЛЕТОМ

В таблице 1 приведены число ночей наблюдений в магнитно-спокойных условиях и соответствующие средние интенсивности эмиссии 630.0 нм для четырех месяцев в 1990–2007 гг. В последней колонке также указаны 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 Рэлей в максимумах (1991 и 2002 гг.) и 34–50 Рэлей в минимумах (1995 и 2007 гг.) солнечной активности. Из таблицы видно, что многолетние ряды данных наиболее заполнены по годам для февраля и марта.

На рисунке 1а, б, в сопоставлены многолетние вариации интенсивности эмиссии 630.0 нм для этих месяцев с изменением индекса солнечной активности $F10.7$ в 22-ом и 23-ем циклах. Разная амплитуда вариаций ночного свечения для февраля и марта обусловлена сезонной зависимостью. По редким измерениям с 1991 по 1997 гг. можно говорить о выраженной тенденции значительного уменьшения 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

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			
	Число ночей	Г ср. за эти ночи	Число ночей	Г ср. за эти ночи	Число ночей	Г ср. за эти ночи	Число ночей	Г ср. за эти ночи	Число ночей	Г ср. за эти ночи	Число ночей	Г среднее
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 и средние интенсивности эмиссии 630.0 нм в полуночные часы для указанных месяцев в 1990–2007 гг.

1997–2007 гг. уже видна тесная связь интенсивности эмиссии 630.0 нм с индексом $F10.7$ в 23-ем цикле активности Солнца. В данном случае выявлены вариации эмиссии 630.0 нм синфазные с вариациями солнечной активности на географической широте 63° N.

Известно, что и среднегодовые значения f_oF2 для ночных часов на средних широтах, отражающих уровень ионизации области F , изменяются также синфазно с циклами солнечной активности [Фишкова, 1983; Гивишвили и др., 1996]. Это дает основание полагать, что многолетние вариации интенсивности красной линии, а также ионизации ночного слоя $F2$ обусловлены соответствующими циклическими изменениями ультрафиолетового излучения Солнца [Фишкова, 1983].

Мы провели анализ связи интенсивности эмиссии 630.0 нм с вариациями солнечного экстремального ультрафиолета (EUV) 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

рисунке 2а, б представлены вариации интенсивности красной линии и EUV как функции времени для февраля и марта в 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 в феврале и 2.8 раза в марте значительно превышают стандартные ошибки среднего и совпадают с максимумом потока EUV. При этом происходило возрастание излучения EUV в ~3 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-ем цикле солнечной активности.

Изменения солнечной активности вызывают также значительные вариации нейтрального состава верхней атмосферы. При диссоциативной ре-

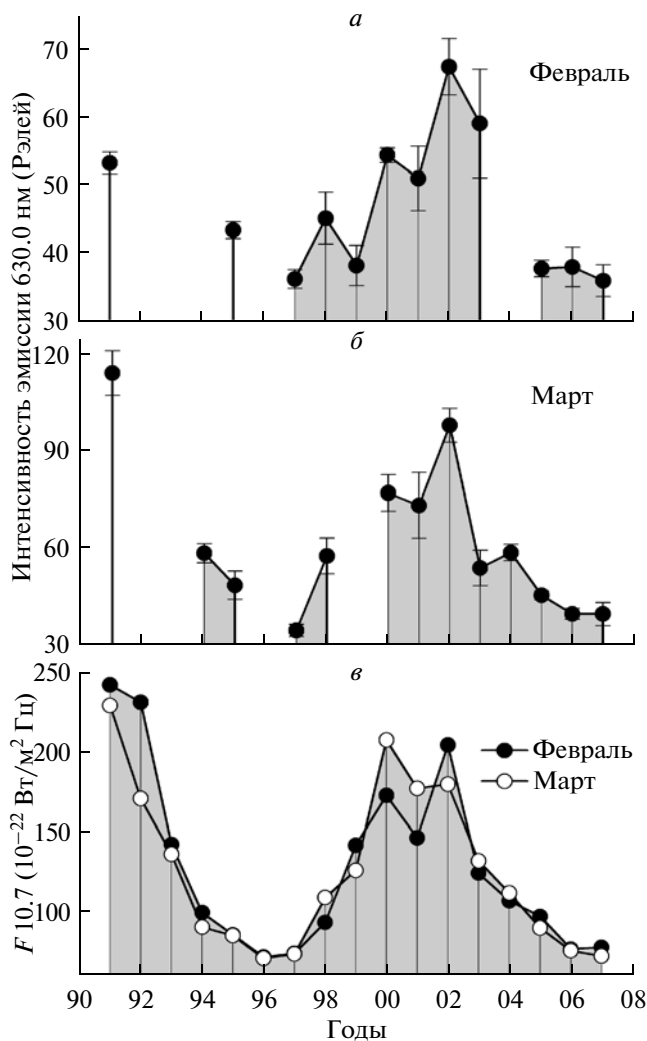


Рис. 1. Многолетние вариации интенсивности эмиссии 630.0 нм в ночном небе на географической широте 63° N и изменение солнечной активности в 1991–2007 гг.

Приведены средние значения измеренной интенсивности красной линии при высоте тени >500 км в магнитно-спокойные дни для февраля (а) и марта (б) в 1991–2007 гг. На графике указаны стандартные ошибки среднего; в, среднемесячные значения индекса $F_{10.7}$ для февраля и марта в 22-ом и 23-ем циклах солнечной активности.

комбинации скорость образования возбужденных атомов $O(^1D)$ в основном определяется концентрацией молекулярного кислорода O_2 и ионов O^+ (электронной плотностью) в максимуме слоя F_2 . 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 F области ионосферы [Vagbier, 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-ем цикле солнечной активности по эмпирической модели MSIS-86 [Hedin, 1987]. Вычисления по этой модели были выполнены на сайте центра данных по солнечной системе в Великобритании

(UK Solar System Data Centre). В таблице 2 приведены средние концентрации N_2 и O_2 в интервале высоты 250–300 км для локальной полночи в дни наблюдений красной линии в феврале и марте 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 F , 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 относительно-

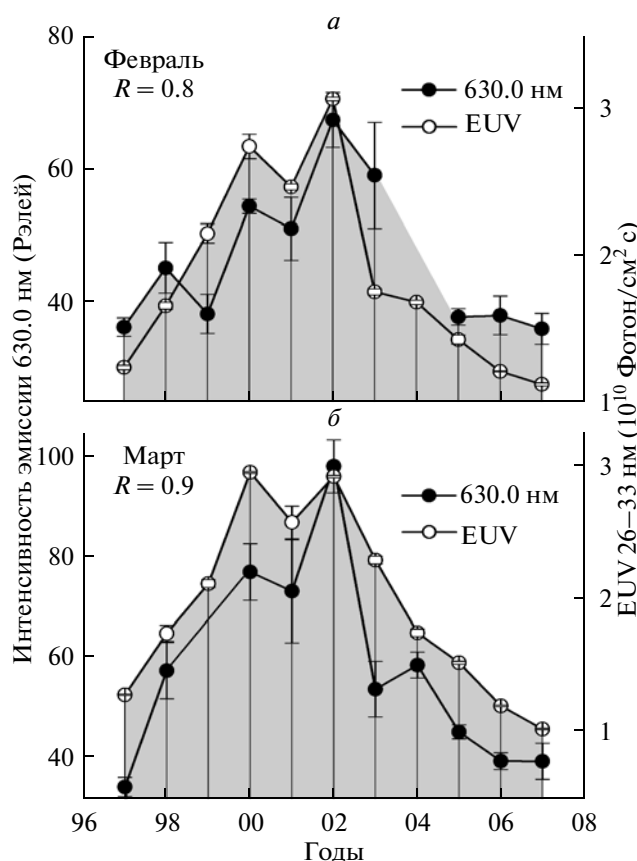


Рис. 2. Вариации интенсивности эмиссии атомарного кислорода 630.0 нм в ночном небе и солнечного экстремального ультрафиолета (EUV) в 1997–2007 гг.

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-ем цикле солнечной активности. На графике указаны стандартные ошибки среднего. Изменение интенсивности эмиссии 630.0 нм во времени происходит синфазно с вариациями EUV с коэффициентами корреляции R , равном 0.8 и 0.9 для февраля и марта соответственно.

го роста концентрации N_2 , определяющей коэффициент дезактивации атомов $O(^1D)$.

Наблюдаемое увеличение интенсивности красной линии в 1.9 в феврале и 2.8 раза в марте тесно

связано с потоком EUV и существенно превышает возможное влияние вариаций нейтрального состава на возбуждение этой эмиссии. Этот фактор, а также закономерная зависимость эмиссии 630.0 нм от

Таблица 2. Изменения концентрации N_2 , O_2 в 23-ем цикле солнечной активности на широте Якутска по эмпирической модели MSIS-86 и соответствующие относительные вариации интенсивности эмиссии 630.0 нм.

Годы	Февраль (см^{-3})		Март (см^{-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	9.6E7	6.1E6	1.3E8	6.2E6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2001	3.6E8	1.4E7	2.9E8	1.7E7	3.8	2.3	1.0	2.2	2.8	1.6
2002	4.3E8	2.7E7	5.4E8	2.5E7	4.5	4.4	1.6	4.1	4.0	1.5
2006	7.0E7	4.0E6	1.4E8	6.5E6	0.7	0.6	0.8	1.1	1.1	1.0
2007	1.1E8	5.4E6	—	—	1.2	0.9	0.8	—	—	—

Примечание: Вычислены средние концентрации N_2 и O_2 в интервале высоты 250–300 км для локальной полночи в дни измерения интенсивности красной линии в феврале и марте. Жирным шрифтом выделены нормированные к 1997 г. концентрации N_2 и O_2 , а также нормированная интенсивность красной линии в годы максимума 23-го цикла.

ионизации ночного слоя F_2 указывают на доминирующую роль солнечного EUV в возбуждении эмиссии 630.0 нм в ночном небе.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Выявлена тесная связь интенсивности эмиссии атомарного 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-ем цикле солнечной активности. Наблюдаемое увеличение интенсивности красной линии существенно превышает возможное влияние вариаций концентрации O_2 и N_2 по эмпирической модели MSIS-86 на возбуждение этой эмиссии.

Закономерная зависимость эмиссии 630.0 нм от ионизации ночного слоя F_2 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 интенсивность эмиссии 630.0 нм в ночном небе.

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 годы были получены с сайта http://www.usc.edu/dept/space_science/sem_data/sem_data.html с материалами эксперимента CELIAS/SEM на космическом аппарате SOHO. Вычисления по модели MSIS-86 были выполнены на сайте UK Solar System Data Centre: <http://www.wdc.rl.ac.uk/wdccc1/msis.html>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В., Петров С.П., Семенов А.И., Сергеев Н.П., Фишкова Л.М., Шефов Н.Н. Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. Т. 32. № 3. С. 329–339. 1996.
- Иевенко И.Б. Абсолютная энергетическая градуировка спектрофотометров методом опорного приемника. Методическое руководство. Якутск: ЯНЦ СО РАН. 22 с. 1995.
- Иевенко И.Б. Воздействие магнитосферной активности на плазмосферу по наблюдениям диффузного сияния и SAR-дуги // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 39. № 6. С. 26–32. 1999.
- Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Влияние суббури и бури на динамику SAR-дуги. Статистический анализ // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 44. № 5. С. 643–654. 2004.
- Михалев А.В., Медведева Н.В., Костылева Н.В. Проявление солнечной активности в вариациях атмосферных эмиссий 557.7 и 630 нм в 23 солнечном цикле // Оптика атмосферы и океана. Т. 2. № 5. С. 425–431. 2008.
- Трутце Ю.Л., Белявская В.Д. Красная кислородная эмиссия λ 630 А и плотность верхней атмосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 15. № 1. С. 101–104. 1975.
- Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли // Тбилиси: Мецниереба. 272 с. 1983.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Юрченко О.Т. Эмпирическая модель вариации эмиссии атомарного кислорода 630.0 нм. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 2. С. 250–260. 2006.
- Чемберлен Дж. Физика полярных сияний и излучения атмосферы // М.: ИИЛ. 777 с. 1963.
- Barbier D. Recherches sur de la raie 6300 Å de la luminescence atmosphérique nocturne // Ann. Geophysicae. V. 15. № 2. P. 179–217. 1959.
- Barbier D. Les variations d'intensité de la raie 6300 Å de la luminescence nocturne // Ann. Geophysicae. V. 17. № 4. P. 3–15. 1961.
- Barbier D. Variations de l'intensité des principales radiations de la luminescence atmosphérique nocturne avec le cycle solaire // Ann. Geophysicae. V. 21. № 3. P. 265–274. 1965.
- Hedin Alan E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res. V. 92. № A5. P. 4649–4662. 1987.
- 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. V. 41/8. P. 1252–1260, DOI: 10.1016/j.asr.2007.07.030, 2008.
- 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. V. 50. № 2. P. 135–140. 1988.