

УДК 550.388

ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИИ НОЧНОГО НЕБА 557.7 НМ В ТЕЧЕНИЕ 23-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2019 г. И. Б. Иевенко¹, *, С. Г. Парников¹, **, В. Н. Алексеев¹, ***

¹Институт космических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера
СО РАН (ИКФИА СО РАН), г. Якутск, Россия

*e-mail: ievenko@ikfia.ysn.ru

**e-mail: parnikov@ikfia.ysn.ru

***e-mail: valexeyev@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 06.03.2019 г.

После доработки 02.04.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

Представлены результаты фотометрических измерений интенсивности эмиссии 557.7 нм ночного неба на высокой географической широте 63° N на меридиане Якутска (130° E) в дни с низкой геомагнитной активностью в 1997–2008 гг. Статистический анализ показал, что многолетние вариации интенсивности зеленой линии атомарного кислорода согласуются с более ранними наблюдениями в низких и на средних широтах. Средняя интенсивность эмиссии 557.7 нм для февраля и марта имела наибольшие значения ~400 и ~300 Рэлей, соответственно, в годы максимума 23-го цикла солнечной активности. Это, вероятно, обусловлено ростом концентрации атомарного кислорода на высоте излучения зеленой линии при увеличении солнечной активности согласно эмпирической модели MSIS-90. Известно, что интенсивность зеленой линии может значительно изменяться в течение ночи. Анализ коэффициента вариации этой эмиссии показал, что нет тесной связи этого параметра с солнечной активностью.

DOI: 10.1134/S0016794019050055

1. ВВЕДЕНИЕ

Зеленая эмиссия атомарного кислорода 557.7 нм является одной из интенсивных эмиссий свечения ночного неба. Основным механизмом возбуждения ночной эмиссии 557.7 нм в нижней термосфере на высоте ~100 км является процесс тройных столкновений атомов кислорода, предложенный С. Чепменом [Чемберлен, 1963; Фишкова, 1983].

Результаты исследований эмиссии 557.7 нм, проводившихся в течение десятков лет, относятся в основном к наблюдениям на средних широтах [Фишкова, 1983; Фишкова и др., 2001]. В ранних работах показано, что интенсивность зеленой линии в течение ночи может изменяться в 1.5–2 раза. Разброс средних за ночь интенсивностей в течение года может превышать 30–50%. Объясняется это тем, что на эмиссию ночного неба 557.7 нм влияют возмущения в средней и верхней атмосфере [Фишкова, 1983; Красовский и др., 1986; Шефов и др., 2006]. Изменчивость средних за ночь и среднемесячных значений интенсивности ночной эмиссии 557.7 нм по данным наблюдений в регионе Восточной Сибири (52° N, 103° E) за пе-

риод 1997–2010 гг. рассмотрена в работе [Михалев, 2011].

В нашей работе впервые проведено исследование вариаций интенсивности зеленой эмиссии на относительно высокой географической широте 63° N в течение 23-го цикла солнечной активности в 1997–2008 гг.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

В работе использованы данные наблюдений на ст. Маймага (63° N, 130° E; геомагнитная широта 57° N). Регистрация свечения осуществлялась с помощью цифрового сканирующего вдоль меридиана фотометра с двумя каналами параллельной регистрации эмиссий 630.0 и 557.7 нм [OI]. В фотометре установлены полосовые интерференционные светофильтры с полушириной ~2 нм. Фоновое излучение контролировалось интерференционными фильтрами на длине волны 620.0 и 575.0 нм с полушириной ~2 нм. Входной объектив фотометра диаметром 100 мм с полем обзора 3° обеспечивает достаточную чувствительность для измерений слабых эмиссий в ночном небе и субавроральном свечении. Сканирование от южного горизонта до северного занимает 23 с. Интервал

между сканированиями от 1 до 5 мин. Наблюдения проводились в безлунные ночи зимних и весенних месяцев в условиях хорошей прозрачности атмосферы. На географической широте 63°N с конца апреля по сентябрь ночи становятся белыми. Абсолютная энергетическая градуировка фотометра проводилась методом опорного приемника [Иевенко, 1995]. Чувствительность фотометра в начале каждой ночи наблюдений проверялась по стабильному источнику света. По сканограммам определялась интенсивность зеленой линии атомарного кислорода и континуума путем усреднения нескольких отсчетов в окрестности зенита станции наблюдений. Далее, для определения интенсивности зеленой линии, выполнялось вычитание континуума.

Анализ многолетней вариации интенсивности зеленой линии в свечении ночного неба ограничивается данными наблюдений в дни с низким уровнем геомагнитной активности ($Kp \leq 2_0$ и $Dst \geq -20$ нТл), что связано с относительно высокой геомагнитной широтой станции наблюдения 57°N . На геомагнитных широтах 55° – 57°N наиболее часто наблюдаются среднеширотные красные (SAR) дуги, а также усиливаются высыпания энергичных частиц во время суббурь и слабых магнитных бурь [Иевенко и Алексеев, 2004; Ievenko et al., 2008]. Всего за период наблюдений (1997–2008 гг.) для проведения анализа по исследованию поведения вариаций интенсивности зеленой эмиссии в свечении ночного неба было отобрано 148 ночей.

3. СВЯЗЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИИ 557.7 нм С УРОВНЕМ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В таблице 1 приведены число ночей наблюдений и соответствующие средние интенсивности эмиссии 557.7 нм для пяти месяцев в 1997–2008 гг. Изменение среднегодовой интенсивности от 240–306 Рэлей в максимуме (2000–2002 гг.) до 101–164 Рэлей в минимумах (1997 и 2006–2008 гг.) 23-го цикла солнечной активности согласуется с наблюдениями вариаций интенсивности зеленой линии на средних широтах в четырех циклах солнечной активности [Фишкова, 1983; Гивишвили и др., 1996]. По таблице видно, что многолетние ряды данных наиболее заполнены по годам для февраля и марта. На рисунке 1а, б сопоставлены многолетние вариации средней интенсивности эмиссии 557.7 нм для этих месяцев с изменением солнечной активности по $F10.7$ в течение 23-го цикла. Рисунок показывает рост интенсивности зеленой линии в максимуме и уменьшение на фазе спада солнечной активности. Амплитуда вариации интенсивности зеленой линии в марте значительно превышает две стандартные ошибки среднего и, соответственно, связь интенсивности эмиссии

557.7 нм с солнечной активностью статистически более выражена, чем в феврале. Коэффициенты корреляции, приведенные на рис. 1, равны 0.88 с доверительной вероятностью 0.999 и 0.826 с доверительной вероятностью 0.994 для февраля и марта, соответственно. Они также указывают на статистически значимую зависимость интенсивности эмиссии 557.7 нм от солнечной активности. Наибольшая интенсивность зеленой линии совпадает с максимумом солнечной активности. Видно значительное уменьшение интенсивности эмиссии на спаде солнечной активности в 2003–2006 гг. Увеличение интенсивности эмиссии 557.7 нм при низкой солнечной активности в 2008 г. может быть связано с усилением влияния на ее возбуждение динамических процессов в средней атмосфере.

Согласно известным механизмам возбуждения эмиссии 557.7 нм в ночном небе ее интенсивность должна быть пропорциональна концентрации атомов кислорода в нижней термосфере [Фишкова, 1983]. Мы выполнили анализ изменения концентрации атомарного кислорода на высотах 95–105 км в 23-м цикле солнечной активности по эмпирической модели MSIS-90 для интервалов времени фотометрических наблюдений на широте Якутска. На рисунке 2а, б приведены корреляционные зависимости средних значений интенсивности зеленой эмиссии от средних значений концентрации атомарного кислорода в феврале и марте 1997–2008 гг. С ростом концентрации атомарного кислорода увеличивается интенсивность эмиссии 557.7 нм. Статистически значимая корреляция получена для марта месяца с коэффициентом корреляции $R = 0.82$ и доверительной вероятностью $P = 0.99$. Следовательно, увеличение интенсивности эмиссии 557.7 нм в период максимума 23-го цикла солнечной активности (2001–2002 гг.) обусловлено ростом концентрации атомарного кислорода на высоте излучения зеленой линии согласно эмпирической модели MSIS-90.

4. МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИИ 557.7 нм

Известно, что интенсивность зеленой линии в течение ночи может изменяться в 1.5–2 раза. Наши наблюдения также показали большое разнообразие вариаций интенсивности ночной эмиссии 557.7 нм. На рисунке 3 показаны примеры вариаций интенсивности зеленой линии атомарного кислорода и континуума в области 575.0 нм. Во время наблюдений 07.02.2008 г. (рис. 3а) ночная вариация имеет два максимума, интенсивность изменяется от ~120 до 200 Рэлей. В следующую ночь (рис. 3б), динамика зеленой линии менее активна. В первую половину ночи происходит плавный подъем интенсивности со ~150 до

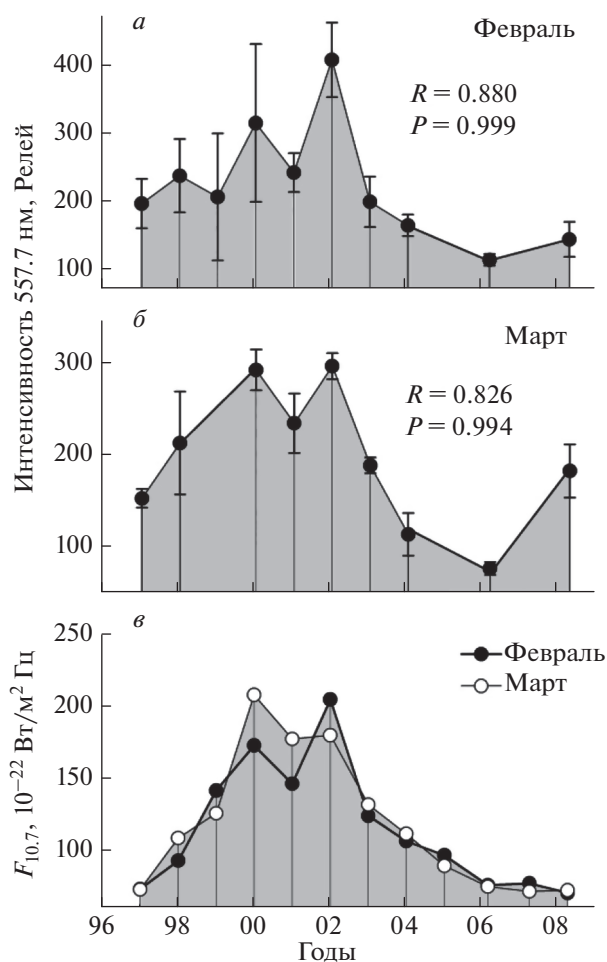


Рис. 1. Вариации средней интенсивности эмиссии 557.7 нм для февраля (а) и марта (б) в 1997–2008 гг. На графиках указаны стандартные ошибки среднего и приведены коэффициенты корреляции R и доверительные вероятности P . в – изменение среднемесячного индекса $F_{10.7}$ для февраля и марта в 23-м цикле солнечной активности.

330 Рэлей, во второй половине происходит симметричное падение. На третьем примере (рис. 3в) видно, что с начала наблюдений (08 UT) регистрируется относительно стабильное свечение в эмиссии 557.7 нм, которое прерывается 4-часовой вариацией в интервале 14–18 UT с одним максимумом ~ 370 Рэлей. Далее, интенсивность снова стабилизируется на уровне ~ 200 Рэлей до конца наблюдений. Из рассмотренных выше примеров видно, что ночной ход интенсивности зеленой линии нерегулярен. Большая изменчивость интенсивности эмиссии 557.7 нм в течение ночи является результатом воздействия возмущений в средней и нижней атмосфере [Фишкова, 1983; Красовский и др., 1986].

Многолетние изменения коэффициента вариации (изменчивости) зеленой линии могут быть индикатором степени возмущенности нижней

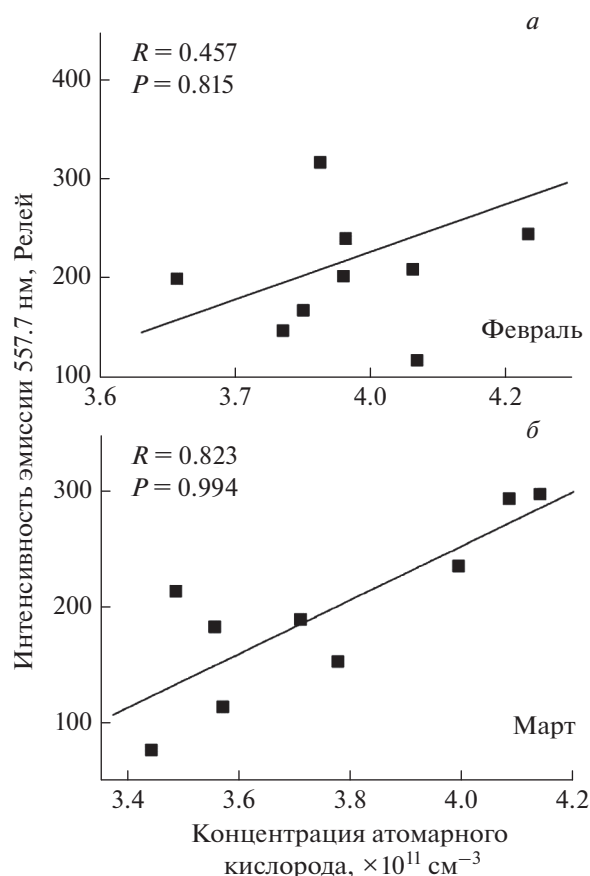


Рис. 2. Корреляционная зависимость интенсивности эмиссии 557.7 нм от концентрации атомарного кислорода для февраля (а) и марта (б). Приведены коэффициенты корреляции R и доверительные вероятности P .

нейтральной атмосферы, которая, в свою очередь, обусловлена метеорологическими явлениями. Коэффициент вариации в работе определялся как отношение стандартного отклонения к среднему значению интенсивности эмиссии для отдельных ночей. Следует отметить, этот параметр свечения ночного неба не зависит от возможных изменений чувствительности фотометра при проведении наблюдений в течение многих лет. Расчеты среднего значения интенсивности зеленой линии и ее стандартного отклонения выполнялись по всем измерениям в течение ночи со скважностью 1–5 мин. Затем вычислялось среднее значение этого коэффициента для каждого месяца по числу ночей наблюдений. Рисунок 4 показывает изменение коэффициента вариации для февраля и марта в 23-м цикле солнечной активности. На графиках можно видеть, что коэффициент вариации интенсивности эмиссии 557.7 нм не имеет тесной связи с солнечной активностью. Увеличение коэффициента вариации в 1998–2000 гг. в феврале и марте совпадает с ростом сол-

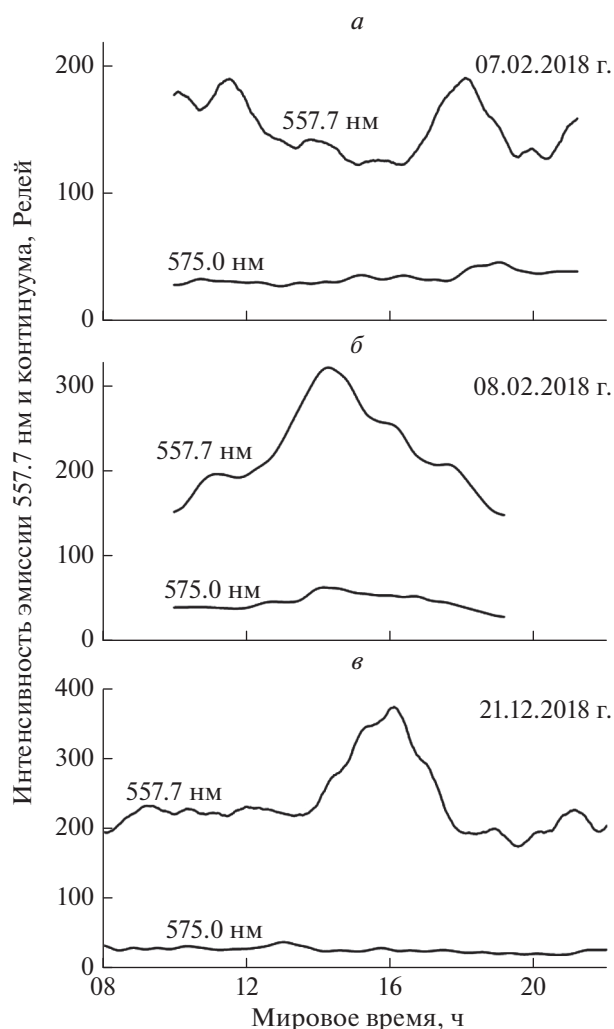


Рис. 3. Примеры вариаций интенсивности эмиссии 557.7 и континуума на длине волны 575.0 нм в течение ночи 07.02.2008 г. (а); б и в – то же самое для 08.02 и 21.12.2008 г. соответственно.

ночной активности. Далее, значительное уменьшение изменчивости интенсивности зеленой линии произошло во время максимума солнечной активности. Следующее статистически значимое увеличение коэффициента вариации существенно больше двух стандартных ошибок среднего произошло в 2006–2008 гг. при глубоком минимуме активности Солнца. Вероятно, этот рост изменчивости интенсивности эмиссии 557.7 нм обусловлен усилением волновых возмущений в средней и верхней атмосфере. Коэффициенты корреляции, приведенные на рис. 4, имеют небольшие значения с низкой доверительной вероятностью, что также указывает на отсутствие статистически значимой зависимости коэффициента вариации от солнечной активности.

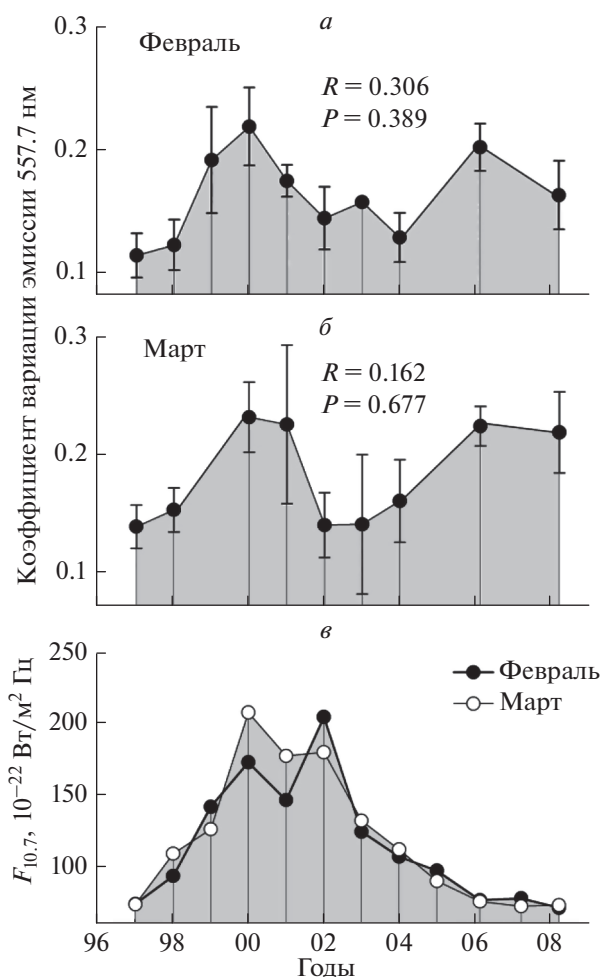


Рис. 4. Коэффициент вариации эмиссии 557.7 нм для февраля (а) и марта (б) в 1997–2008 гг. На графиках указаны стандартные ошибки среднего и приведены коэффициенты корреляции R и доверительные вероятности P . в – индекс $F10.7$ для февраля и марта в 23-м цикле солнечной активности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые проведены фотометрические наблюдения эмиссии ночного неба 557.7 нм на высокой географической широте 63° N. Многолетние вариации интенсивности эмиссии 557.7 нм в первом приближении совпадают с вариациями, полученными в более ранних исследованиях свечения ночного неба в низких и на средних широтах [Фишкова, 1983].
2. Показана статистически значимая связь интенсивности эмиссии 557.7 нм с солнечной активностью. Средняя интенсивность этой эмиссии для февраля и марта имеет наибольшие значения в период максимума 23-го цикла солнечной активности (2001–2002 гг.).
3. Увеличение интенсивности эмиссии 557.7 нм в период максимума солнечной активности обу-

Таблица 1. Данные наблюдений эмиссии 557.7 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> | <i>I</i> ср. |
| 1997 | | | | | 4 | 199 | 6 | 154 | 4 | 138 | 14 | 164 |
| 1998 | | | | | 3 | 240 | 6 | 215 | 2 | 119 | 11 | 191 |
| 1999 | 2 | 205 | 5 | 134 | 4 | 209 | | | | | 11 | 183 |
| 2000 | | | | | 2 | 317 | 5 | 295 | | | 7 | 306 |
| 2001 | | | | | 6 | 244 | 4 | 236 | | | 10 | 240 |
| 2002 | | | 6 | 244 | 5 | 409 | 7 | 299 | 4 | 58 | 22 | 253 |
| 2003 | 3 | 133 | 4 | 236 | 2 | 201 | 2 | 190 | | | 11 | 190 |
| 2004 | | | 2 | 160 | 6 | 167 | 4 | 114 | | | 12 | 147 |
| 2005 | | | | | | | | | | | | |
| 2006 | | | 6 | 108 | 8 | 117 | 13 | 77 | | | 27 | 101 |
| 2007 | | | | | | | | | | | | |
| 2008 | 8 | 166 | | | 5 | 147 | 5 | 184 | | | 18 | 166 |

Примечание: В таблице приведены число ночей наблюдений (*N*) в магнитоспокойных условиях и соответствующие средние интенсивности эмиссии 557.7 нм (*I* ср) для пяти месяцев каждого года за период 1997–2008 гг. В последней колонке указаны также средние интенсивности по годам.

словлено ростом концентрации атомарного кислорода на высоте излучения зеленой линии согласно эмпирической модели MSIS-90.

4. Увеличение коэффициента вариации интенсивности эмиссии 557.7 нм происходило как во время роста, так и в минимуме солнечной активности. Это указывает, вероятно, на связь роста коэффициента вариации с усилением волновых возмущений в средней и верхней атмосфере.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Вычисления по модели MSIS-90 были выполнены на сайте UK Solar System Data Centre: (<http://www.wdc.rl.ac.uk/wdcc1/msis.html>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 18-45-140037 p_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В. и др. 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 прием-

ника. Методическое руководство. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 22 с. 1995.

– 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.

– Красовский В.И., Семенов А.И., Соболев В.Г., Тихомиров А.В. Вариации доплеровской температуры и интенсивности эмиссии 557.7 нм при прохождении ВГВ // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 26. № 6. С. 941–945. 1986.

– Михалев А.В. Вариабельность атмосферной эмиссии 557.7 нм // Солнечно-земная физика. Изд-во СО РАН. № 17. С. 184–188. 2011.

– Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли // Тбилиси: Мецниереба. 272 с. 1983.

– 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 аэрномия. Т. 41. № 4. С. 557–562. 2001.

– Шефов Н.Н., Семенов А.Н., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы-индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 741 с. 2006.

– Чемберлен Дж. Физика полярных сияний и излучения атмосферы // М.: ИИЛ. 777 с. 1963.

– 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. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.07.030>