

УДК 550.338

## Влияние атмосферного аэрозоля на результаты наземных наблюдений излучения верхней атмосферы

А.В. Михалев<sup>1</sup>, М.А. Тащилин<sup>1</sup>, С.М. Сакерин<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126 а, а/я 291

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 12.02.2019 г.

Приводятся результаты исследования влияния атмосферного аэрозоля на регистрируемое излучение верхней атмосферы Земли. Использовались данные наблюдений автоматизированного солнечного фотометра SE-318, входящего в состав мировой наземной сети станций AERONET, и данные наблюдений интенсивностей эмиссионных линий атомарного кислорода [OI] 557,7 и 630,0 нм в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.). Выявлен нелинейный характер корреляционной зависимости интенсивности эмиссий верхней атмосферы 557,7 и 630,0 нм от аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы: рост коэффициентов корреляции при малых значениях АОТ (до 0,5) и спад при больших замутнениях. Выделен интервал наблюдений с высокой положительной корреляцией между интенсивностями эмиссий 557,7; 630,0 нм и АОТ, предположительно связанный с обширными очагами лесных пожаров.

*Ключевые слова:* атмосферный аэрозоль, АОТ, излучение верхней атмосферы Земли; atmospheric aerosol, AOD, airglow.

### Введение

При исследованиях излучения верхней атмосферы Земли и астрономических наблюдениях необходимо знание спектральной прозрачности атмосферы и других элементов астроклимата и оптической погоды [1–3]. Теоретическим вопросам переноса излучения в атмосфере Земли, в частности излучению верхних слоев атмосферы, посвящено достаточно большое количество работ (см., например, [4, 5]). Так, в [5] теоретически решалась задача о диффузном пропускании атмосферой излучения от сферического светящегося слоя применительно к кислородным эмиссиям 557,7 и 630,0 нм и был сделан вывод, что интенсивности свечения верхних слоев, полученные при различных прозрачностях, сильно отличаются друг от друга и для правильного учета атмосферного ослабления необходимо параллельно с измерениями интенсивности свечения измерять и прозрачность атмосферы. Кроме научного интереса, эти задачи имеют большое практическое значение.

Некоторые вопросы экспериментального наблюдения распространения оптического излучения верхних слоев атмосферы с учетом молекулярного рассеяния в атмосфере, а также рассеяния и поглощения аэрозольными компонентами среды и отражения от поверхности Земли обсуждаются в публикации [6].

В ней отмечается, что в последние десятилетия большое внимание уделяется исследованию влияния различных гелиогеофизических условий на общую картину светимости ночного неба в обсерваториях мира. Это связано с тем, что излучение ночной атмосферы является естественным неустранимым фоном в наземной наблюдательной астрономии при регистрации частиц сверхвысоких энергий по их оптическому проявлению в атмосфере Земли, при эксплуатации оптико-электронных систем наземного и космического базирования, в других прикладных задачах (см., например, [7, 8]).

В настоящей работе для условий Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д., регион Тункинской долины, граница Иркутской обл. и Республики Бурятия) приводятся результаты исследования влияния атмосферного аэрозоля на регистрируемое излучение верхней атмосферы Земли. В Тункинской долине расположены оптические комплексы по исследованию физики Солнца и оптики средней и верхней атмосферы Земли, мониторингу околоземного космического пространства (Саянская солнечная и Геофизическая обсерватории ИСЗФ СО РАН, <http://www.iszf.irk.ru>), астрофизики элементарных частиц и гамма-астрономии (Научно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского государственного университета (ИГУ), <http://apidev.isu.ru/index.php/laga/>), физике метеорных явлений (Астрономическая обсерватория ИГУ, <http://astra.isu.ru>). В связи с этой информацией о влиянии аэрозольного состояния атмосферы на прохождение оптического излучения

\* Александр Васильевич Михалев (mikhalev@iszf.irk.ru); Михаил Анатольевич Тащилин (miketash@iszf.irk.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru).

в различных спектральных диапазонах является актуальной задачей для региона.

## Аппаратура и используемые данные

Для определения аэрозольной оптической толщи (АОТ) и влагосодержания атмосферы ( $W$ ) использовались данные автоматизированного солнечного фотометра CE-318, расположенного в ГФО ИСЗФ СО РАН и входящего в состав мировой наземной сети станций AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Анализировались данные в 8 спектральных каналах 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 и 1020 нм. Использовались средние дневные значения АОТ по уровню обработки 1,5, включающей автоматическую фильтрацию облачности. Данные по АОТ для ГФО на сайте [aeronet.gsfc.nasa.gov](https://aeronet.gsfc.nasa.gov) представлены в основном для весеннего, летнего и осеннего периодов, так как зимой фотометр отправлялся на ежегодную калибровку.

Наблюдения излучения верхней атмосферы Земли осуществляются также в ГФО ИСЗФ СО РАН комплексом оптических инструментов, таких как спектрографы, широкоугольные цветные и монохроматические камеры, интерферометр Фабри–Перо (<http://atmos.iszf.irk.ru/>). Все оптические инструменты функционируют в полностью автоматическом режиме. В настоящей работе использовались только данные патрульного спектрографа (<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/data/spectr>) по интенсивности в эмиссионных линиях атомарного кислорода [OI] 557,7 и 630,0 нм. Выбор этих линий обусловлен тем, что это самые яркие дискретные линии в излучении ночной атмосферы, которые наиболее часто используются при исследованиях верхней атмосферы и ионосферы Земли. Патрульный спектрограф ориентирован в северном направлении с возвышением оптической оси над горизонтом  $\sim 23^\circ$ , угловое поле зрения  $\leq 25 \cdot 0,5^\circ$ , время экспозиции 260 с. Следует отметить, что данные по АОТ относятся к дневному периоду, в то время как регистрация излучения верхней атмосферы Земли осуществляется ночью. В работе использовались результаты наблюдений за 2016–2018 гг.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 для 2017 и 2018 гг. представлены коэффициенты корреляций между интенсивностями эмиссий 557,7 и 630,0 нм и АОТ в зависимости от длины волны, на которой определялась АОТ. Использовались все исходные данные АОТ и данные по эмиссиям 557,7 и 630,0 нм без дополнительной обработки. Прежде всего следует отметить более высокие значения коэффициентов корреляции для эмиссии 630,0 нм по сравнению с эмиссией 557,7 нм для всех длин волн и тенденцию спектральной зависимости этих коэффициентов от длины волны, на которой определяется АОТ. Кроме того, для эмиссии 557,7 нм коэффициенты корреляции в 2018 г. для большинства длин волн АОТ оказались ниже

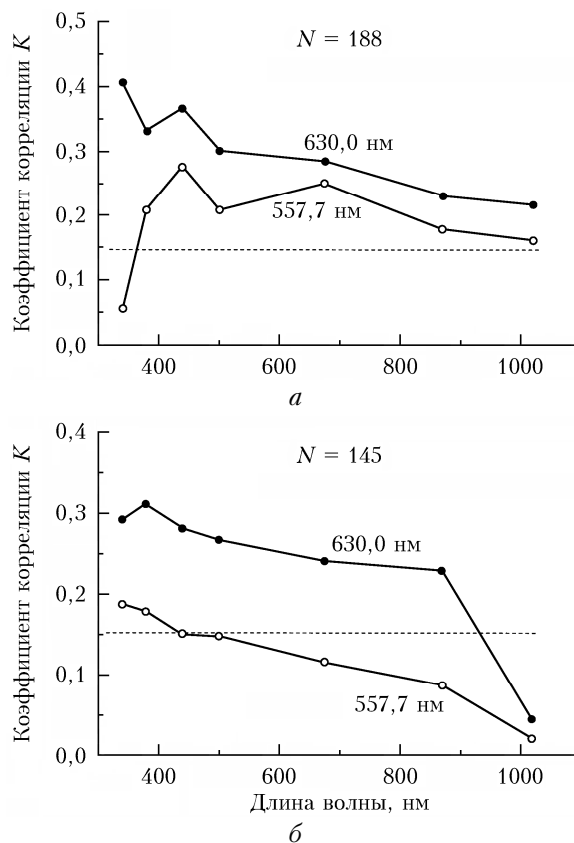


Рис. 1. Коэффициенты корреляций между эмиссиями атомарного кислорода [OI] 557,7 и 630,0 нм и АОТ (на длинах волн 340, 380, 440, 500, 675, 870 и 1020 нм) в 2017 (а) и 2018 гг. (б). Штриховые линии – уровни достоверности коэффициентов корреляции

уровня статистической достоверности, что, вероятно, может говорить о неустойчивости или слабой зависимости этой эмиссии от вариаций АОТ.

Эмиссия 557,7 нм менее чувствительна к изменению аэрозольной прозрачности атмосферы и влагосодержания по сравнению с эмиссией 630,0 нм, что, вероятно, связано с меньшим коэффициентом поглощения в зеленой области спектра по сравнению с красной, по крайней мере для некоторых типов слоистых водных облаков [6, 9]. Что касается спектральной зависимости, то можно предположить, что основной вклад в ослабление наблюдаемого свечения вносится АОТ в коротковолновой части, где преобладает влияние мелкодисперсного аэрозоля.

Была предпринята попытка исследования анализируемых зависимостей на большем количестве статистического материала с использованием АОТ только на одной длине волны 500 нм ( $АОТ_{500}$ ). На рис. 2 показаны зависимости интенсивностей эмиссий 630,0 и 557,7 нм от величины  $АОТ_{500}$  в 2016–2018 гг. по всем исходным данным наблюдений. На рис. 3 представлены вариации интенсивностей эмиссий 630,0 и 557,7 нм от величины  $АОТ_{500}$  для этих же лет, но после удаления сезонных ходов в данных по эмиссиям (летних максимумов). Это связано с тем, что как в сезонных ходах АОТ,

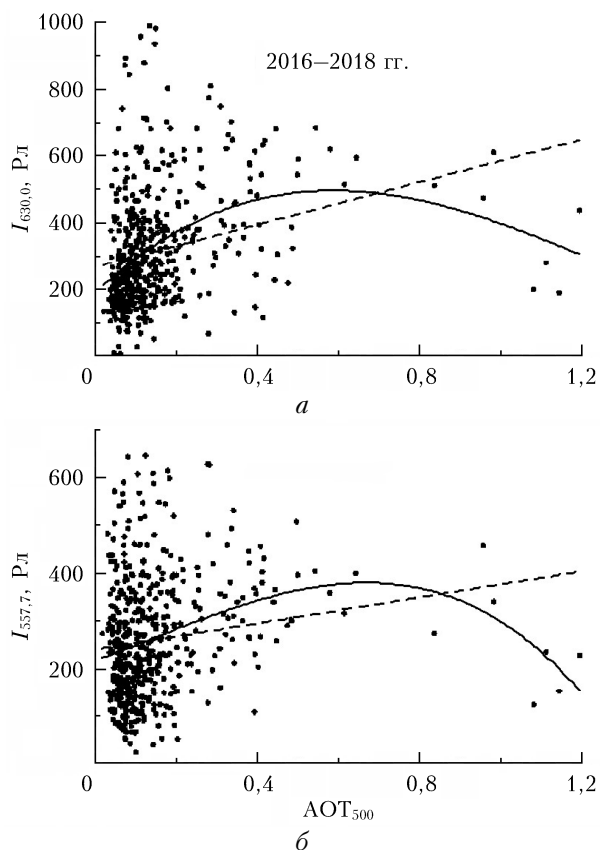


Рис. 2. Зависимость интенсивностей эмиссий 630,0 (а) и 557,7 нм (б) от  $AOT_{500}$ . Точки – данные наблюдений; штриховые линии – линейная интерполяция данных, сплошные – интерполяция полиномами 2-й степени

так и в сезонных ходах эмиссий 630,0 и 557,7 нм могут отмечаться летние максимумы, которые имеют разную физическую природу [10–12], но могут давать свой вклад в коэффициенты корреляции. Сезонный ход для эмиссий 630,0 и 557,7 нм интерполировался полиномами 3-й степени. Результат удаления сезонных ходов с летними максимумами хорошо виден на рис. 5 при интерпретации пирогенных событий. На рис. 5, а приведены данные наблюдений для каждого параметра, полужирной линией показан интерполируемый сезонный ход анализируемой величины, и их значения после удаления сезонного хода (рис. 5, б).

Анализ рис. 2 и 3 позволяет предположить, что зависимость влияния АОТ на регистрируемые интенсивности эмиссий верхней атмосферы 557,7 и 630,0 нм в диапазоне значений  $AOT_{500} \sim 0,05–1,2$  может носить нелинейный характер. В частности, для  $AOT_{500}$  в диапазоне 0,05–1,2 коэффициент корреляции с эмиссией 630,0 нм составил  $\sim 0,086$ , что при количестве пар сопоставляемых значений  $N = 485$  попадает на границу статистической значимости. В диапазоне значений  $AOT_{500}$  до  $\sim 0,5–0,6$  эта зависимость слабая положительная (эмиссия 630 нм) или отсутствует (эмиссия 557,7 нм). При  $AOT_{500}$  более  $\sim 0,5–0,6$  отмечается отрицательная корреляция с анализируемыми эмиссиями, которая соответствует

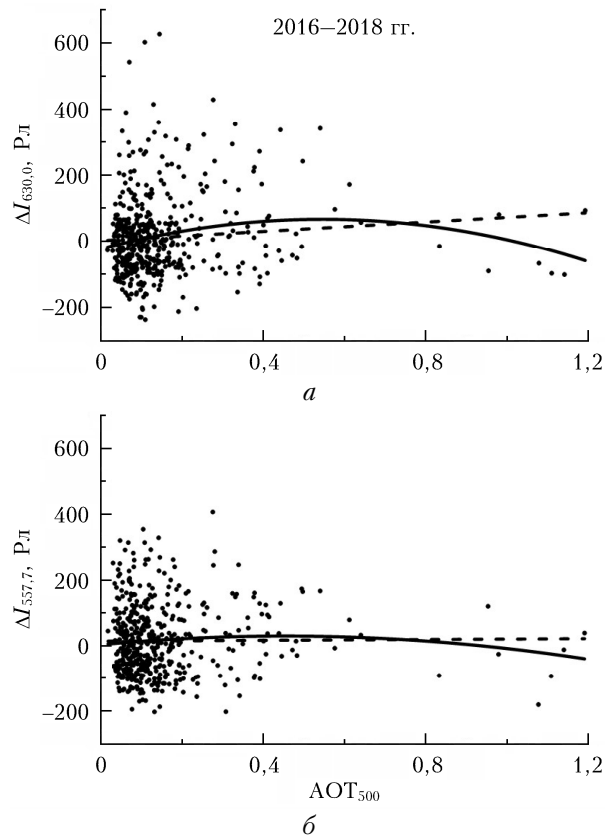


Рис. 3. Зависимость интенсивностей эмиссий 630,0 (а) и 557,7 нм (б) от  $AOT_{500}$  после удаления сезонных ходов в эмиссиях. Обозначения см. на рис. 2

«нормальному» характеру зависимости проходящего излучения от прозрачности атмосферы. Значения АОТ порядка 0,5–0,6 в 2–3 раза превышают средние значения  $AOT_{500}$  для Тункинской долины [6]. На полученный результат, касающийся «нелинейности», в какой-то степени могли повлиять два обстоятельства: а) увеличение погрешности измерений АОТ в области больших значений (0,8–1); б) погрешность, обусловленная временным сдвигом сроков измерений АОТ (день) и эмиссий (ночь). Корректный учет этих факторов пока не представляется возможным.

Если отдельно рассматривать диапазон  $AOT_{500} \sim 0,05–0,6$  (рис. 4, а), то коэффициент положительной корреляции с эмиссией 630,0 нм составил  $\sim 0,17$ , что при  $N = 478$  является статистически значимым. В этом диапазоне полином 2-й степени практически совпадает с линейной экстраполяцией. Для эмиссии 557,7 нм также сохраняется слабая линейная зависимость, но коэффициент корреляции составил  $\sim 0,07$ , что для указанного количества наблюдений не является статистически значимым.

Для эмиссии 630,0 нм также можно отметить нелинейную зависимость от влагосодержания в атмосфере, положительную при  $W < 2,5$  см и отрицательную при  $W > \sim 2,5$  см. Коэффициент корреляции для всего диапазона влагосодержания составил  $\sim 0,24$  (см. рис. 4, б).

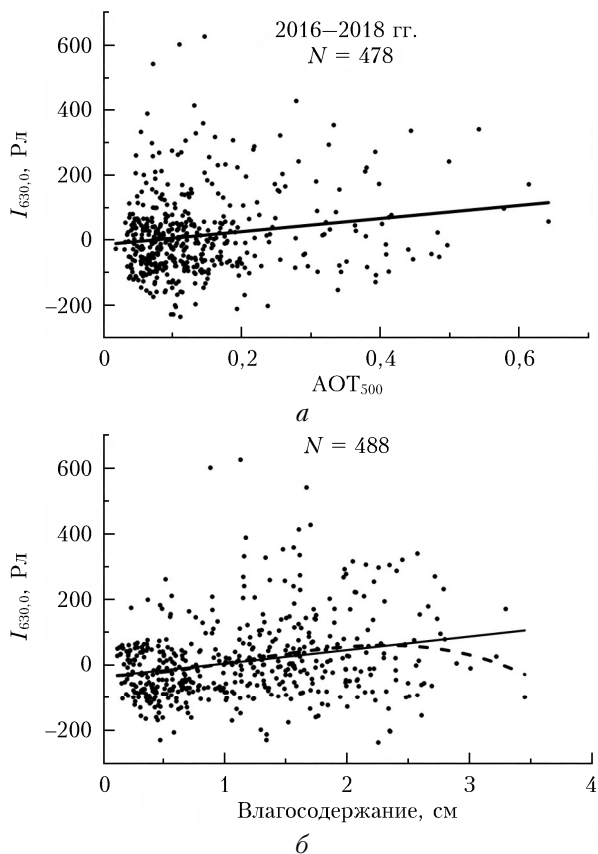


Рис. 4. Зависимость интенсивности эмиссии 630,0 нм от величины  $AOT_{500}$  (а) и влагосодержания (б)

Приведенные на рис. 4 линии регрессии имеют следующие выражения:

$\Delta I_{630}$  (Рл) = 201,8( $AOT_{500}$ ) – 14,9, коэффициент детерминации ~0,029 (рис. 4, а);

$\Delta I_{630}$  (Рл) = 41,2W – 35,6, коэффициент детерминации ~0,059 (рис. 4, б).

Нелинейный характер зависимостей регистрируемых интенсивностей эмиссий верхней атмосферы 557,7 и 630,0 нм от АОТ в диапазоне значений  $AOT_{500} \sim 0,05-1,2$ , как и их аномальный характер в диапазоне значений  $AOT_{500} \sim 0,05-0,6$  (отсутствие статистически значимой зависимости для эмиссии 557,7 нм и слабая положительная зависимость для эмиссии 630,0 нм), могут быть связаны с неравномерным пространственным распределением яркости этих эмиссий в месте проведения наблюдений. Это прежде всего увеличение яркости к горизонту за счет эффекта Ван Райна [4], широтные зависимости этих эмиссий [1] и др. Регистрируемое излучение верхних слоев атмосферы из выделенного направления складывается из прямого проходящего излучения и рассеянного излучения со всей полусферы (на этих же длинах волн) на атмосферных составляющих и аэрозоле в пределах углового поля зрения регистрирующей аппаратуры. Если существуют более яркие протяженные области излучения верхней атмосферы вне поля зрения регистрирующей аппаратуры, можно предположить, что в некотором диапазоне увеличения АОТ доля рассеянного

излучения от более ярких областей небосвода будет компенсировать (или превышать) снижение прямого проходящего излучения за счет поглощения и обратного рассеяния. Этот эффект в некотором смысле подобен хорошо известному явлению увеличения яркости ясного неба при появлении некоторых видов облаков [13, 14].

*Пирогенные события.* Иркутская обл. и Республика Бурятия относятся к пожароопасным регионам России. Лесные пожары – мощный источник дымового аэрозоля, который существенно влияет на оптические характеристики атмосферы [15]. Крупномасштабные задымления атмосферы ежегодно наблюдаются в регионе Тункинской долины в весенне-летние периоды, что может представлять определенный интерес для настоящего исследования. На рис. 5 приведены результаты наблюдений за  $AOT_{500}$  и излучением эмиссии 630,0 нм для всех исходных данных 2017 г. (рис. 5, а) и данные для летнего периода этого года с обширными лесными пожарами на северо-западе и севере Иркутской обл. (рис. 5, б, в).

Данные для летнего периода были получены путем удаления сезонных ходов  $AOT_{500}$  и интенсивности эмиссии 630,0 нм (полиномы 2-й степени показаны сплошными линиями на рис. 5, а). На рис. 5, в изображены пожары в Иркутской обл. и Республики Бурятия для трех дней летнего периода (по данным космических снимков компании СКАНЭКС (<http://fires.ru/>)). Три снимка отвечают первому максимуму, первому минимуму и второму максимуму на рис. 5, б; коэффициент корреляции  $K = 0,336$ , что в ~2 раза превышает коэффициент корреляции, полученный по трехлетнему периоду.

Следует отметить, что ситуация с лесными пожарами, представленная на рис. 5, б для летнего периода 2017 г., может не давать статистически значимых коэффициентов корреляции между АОТ и регистрируемыми интенсивностями эмиссий 557,7 и 630,0 нм для аналогичных ситуаций с лесными пожарами в 2016 и 2018 гг. Это может быть связано с различием или аномалией атмосферной циркуляции в анализируемые интервалы времени [15].

## Заключение

Таким образом, исследования по влиянию прозрачности атмосферы на результаты наземных наблюдений излучения верхней атмосферы в эмиссиях 557,7 и 630,0 нм позволяют сделать следующие выводы.

1. Отмечается спектральная зависимость коэффициентов корреляции между интенсивностями эмиссий  $I_{557,7}$ ,  $I_{630,0}$  и АОТ. Данные интенсивности имеют тенденцию к большим значениям коэффициентов корреляции с АОТ, определенной для более коротких длин волн.

2. Выявлен нелинейный характер корреляционной зависимости интенсивности эмиссий верхней атмосферы 557,7 и 630,0 нм от АОТ атмосферы: рост коэффициентов корреляции при малых значениях АОТ (до 0,5) и спад при больших замутнениях.



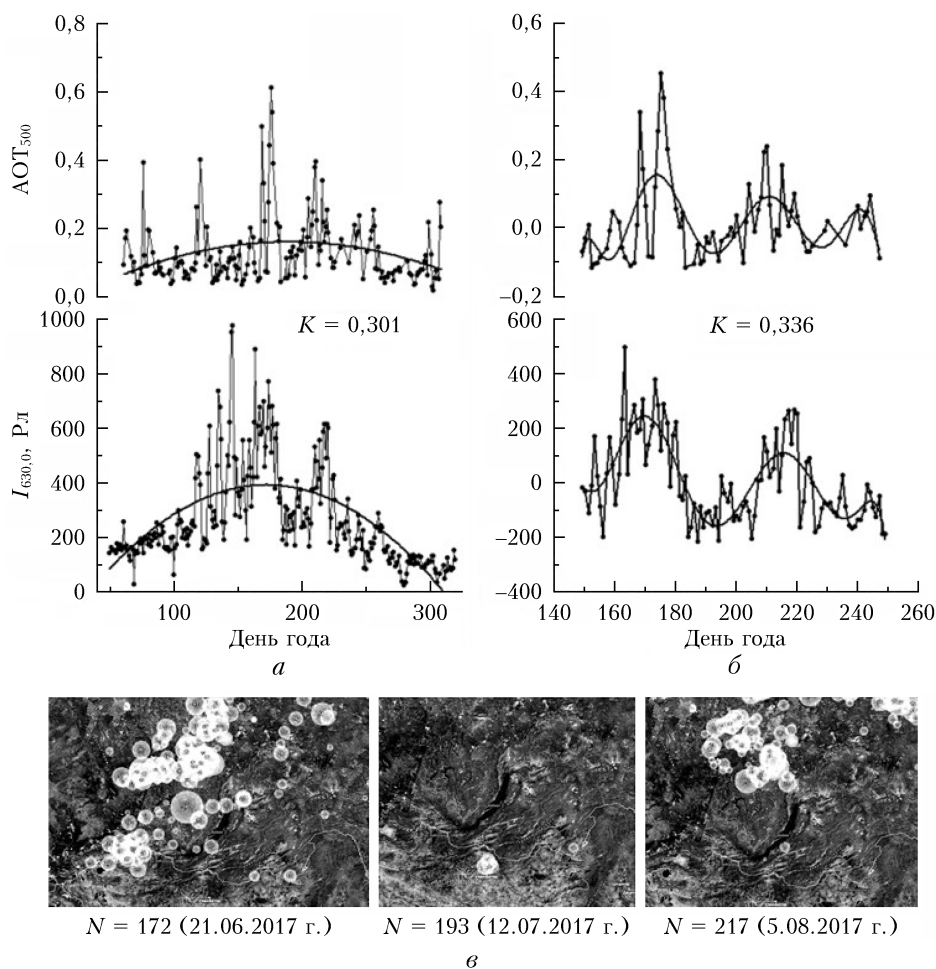


Рис. 5. Зависимость  $AOT_{500}$  и излучения эмиссии 630,0 нм в 2017 г. для всех данных наблюдений (а), для летнего периода с пожарами (б); пожары на снимках компании СКАНЭКС (в). Пояснения см. в тексте

3. В диапазоне  $AOT_{500}$  0,05–0,6 для эмиссии 630,0 нм отмечается статистически значимая слабая положительная зависимость, для эмиссии 557,7 нм значимой зависимости не выявлено.

4. Для летнего периода 2017 г. выделен интервал наблюдений с высокой положительной корреляцией между  $I_{557,7}$ ,  $I_{630,0}$  и  $AOT$ , предположительно связанный с обширными очагами лесных пожаров.

Сформулированные выводы относительно нелинейной зависимости между  $I_{557,7}$ ,  $I_{630,0}$  и  $AOT$  и относительно влияния дымового аэрозоля от лесных пожаров на регистрируемые  $I_{557,7}$ ,  $I_{630,0}$  предварительны и, несомненно, требуют дополнительных исследований для подтверждения и уточнения полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-29-05047 офн\_м). Наблюдения излучения верхней атмосферы Земли выполнялись в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16. В работе использовались данные оптического комплекса, входящего в состав ЦКП «Ангара».

1. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 271 с.
2. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Заде Г.О. Оптическая погода. Новосибирск: Наука, 1990. 192 с.

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

4. Чемберлен Дж. Физика полярных сияний и излучения атмосферы. М.: Иностран. лит-ра, 1963. 777 с.

5. Гаврилова Л.А. О диффузном пропускании атмосферой ночного излучения верхних слоев // Изв. АН СССР. Физика атмосф. и океана. 1987. Т. 23, № 10. С. 1098–1101.

6. Будник А.П., Лунев В.П. Свечение ночного неба. Препринт ФЭИ – 3139. Обнинск: Физико-энергетический ин-т им. А.И. Лейпунского. 2008. 61 с.

7. Leinert Ch., Bowyer S., Haikala L.K., Hanner M.S., Hauser M.G., Lévassieur-Regourd A.-Ch., Mann I., Mattila K., Reach W.T., Schlosser W., Staude H.J., Toller G.N., Weiland J.L. The 1997 reference of diffuse night sky brightness // Astron. Astrophys., Suppl. Ser. 1998. V. 127. P. 1–99.

8. Михалев А.В., Хахинов В.В., Белецкий А.Б., Лебедев В.П. Оптические эффекты работы бортового двигателя космического аппарата «Прогресс М-17М» на высотах термосферы // Космические исследования. 2016. Т. 54, № 2. С. 113–118.

9. Erlick C., Frederick J., Saxena V.K., Wenny B.N. Atmospheric transmission in the ultraviolet and visible: Aerosols in cloudy atmospheres // J. Geophys. Res. 1998. V. D103. P. 31941–31556.

10. Михалев А.В., Тащилин М.А. Аэрозольная оптическая толща атмосферы и ее вариации в регионе Восточной Сибири (Тункинская долина) в 2004–2008 гг. // Оп-

- тика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 575–578; *Mikhalev A.V., Tashchilin M.A.* Aerosol Optical Depth and its variations in the Eastern Siberia Region (Tunka Valley) in 2004–2008 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 4. P. 457–460.
11. *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. Spec. Iss. Long-Term Trends: Thermosphere, Mesosphere, Stratosphere and Lower Ionosphere.* 2003. V. 32, N 9. P. 1787–1792.
  12. *Мухалев А.В.* Сезонные и межгодовые вариации атмосферной эмиссии [OI] 630,0 нм по данным наблюдений в регионе Восточной Сибири в 2011–2017 гг. // *Солнечно-земная физика.* 2018. Т. 4, № 2. С. 96–101. DOI: 10.12737/szf-42201809.
  13. *Зверева С.В.* В мире солнечного света. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 160 с.
  14. *Журавлева Т.Б., Бедарева Т.В., Кабанов Д.М., Насртдинов И.М., Сакерин С.М.* Особенности угловых характеристик диффузной солнечной радиации в малооблачной атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 8. С. 777–786; *Zhuravleva T.B., Bedareva T.V., Kabanov D.M., Nasrtidinov I.M., Sakerin S.M.* Specific features of angular characteristics of diffuse solar radiation in a little-cloud atmosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 6. P. 607–616.
  15. *Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И.* Связь задымления атмосферы европейской территории России летом 2016 года с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // *Докл. РАН.* 2017. Т. 472, № 4. С. 456–461.

*A.V. Mikhalev, M.A. Tashchilin, S.M. Sakerin.* **Effect of atmospheric aerosol on the ground-based observation results of the upper atmosphere radiation.**

The study results of the atmospheric aerosol effect on the registered Earth's airglow are presented. We used data from CIMEL CE-318 automated solar photometer, which is a part of the global terrestrial network (AERONET), and observational data of atomic oxygen emission lines [OI] 557.7 and 630 nm in the Geophysical Observatory of the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS (52°N, 103°E). The nonlinear dependence of the 557.7 and 630 nm emissions intensity on the aerosol optical depth (AOD) was revealed. An increase in the correlation coefficients was obtained for small AOD values (up to 0.5), and a decrease, for large turbidity. An observation interval with a high positive correlation between the 557.7 and 630.0 nm emission intensities and AOD, which is supposedly associated with extensive areas of forest fires, was identified.