

Пространственно-временные вариации аэрозольной оптической толщи в Байкальском регионе

М. А. Тащилин¹, И. П. Яковлева¹, С. М. Сакерин²

¹ *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*
E-mail: miketash@iszf.irk.ru

² *Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634021, Россия*
E-mail: sms@iao.ru

В работе рассматриваются особенности пространственно-временного распределения и сезонной изменчивости аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы в области спектра 0,55 мкм на территории Байкальского региона по многолетним данным (2005–2019) спутниковых наблюдений (MODIS/Aqua). Проводится сопоставление спутниковых значений АОТ с результатами наблюдений глобальной сети мониторинга AERONET в Геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН. Показано, что межгодовая изменчивость АОТ в основном обусловлена влиянием лесных пожаров и имеет одинаковый характер: максимальные замутнения атмосферы наблюдались в 2008, 2012 и 2014 гг., минимальные — в 2010, 2013 и 2016 гг. Отмечается факт уменьшения АОТ с ростом широты с градиентом $\Delta\tau = 0,002...0,001$ на градус широты. Средний сезонный ход АОТ в шести пунктах наблюдений характеризуется весенним (апрель) и летним (июль) максимумами и низкими осенними значениями АОТ. От июня к ноябрю спад среднемесячных значений АОТ составляет более 60 %.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, АОТ, спутниковый мониторинг, AERONET, MODIS

Одобрена к печати: 25.02.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-219-226

Введение

Многолетние исследования вариаций радиационно-значимых компонентов атмосферы — одна из задач в контексте проблемы изменения климата Земли. Наряду с парниковыми газами и облачностью важную роль в радиационных процессах играет атмосферный аэрозоль. Основной и наиболее изученной оптической характеристикой аэрозоля выступает аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы. Межгодовые вариации и сезонная изменчивость различных характеристик прозрачности атмосферы (АОТ и др.) на территории России анализировались многими авторами (Байкова, 1998; Жданова и др., 2019; Chubarova et al., 2016; Li et al., 2014 и др.). В настоящее время наиболее полную информацию об изменчивости спектральных АОТ атмосферы даёт глобальная фотометрическая сеть AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>), однако на территории Байкальского региона действует лишь одна станция. АОТ атмосферы восстанавливается также по измерениям солнечной радиации на сети актинометрических станций, но только на длине волны 0,55 мкм (Плахина и др., 2009). В Байкальском регионе такие станции располагаются в г. Бабушкине, с. Иволгинске и пос. Хужир.

В последнее время для анализа пространственно-временных вариаций АОТ атмосферы всё чаще привлекаются данные спутниковых измерений, в частности радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутников Terra/Aqua. Достигнутый уровень погрешности восстановления АОТ считается приемлемым для анализа её пространственно-временной изменчивости (Remer et al., 2005). В настоящей работе обсуждаются межгодовые и сезонные вариации АОТ атмосферы в Байкальском регионе за период 2005–2019 гг. для восьми месяцев года: апрель – ноябрь. Зимние месяцы не анализировались из-за малочисленности данных и большой погрешности определения АОТ над снежной поверхностью (Remer et al., 2005). Для оценки достоверности данных MODIS проведено сопоставление с результатами наземных измерений АОТ фотометром CIMEL-318 в Геофизической обсерватории (ГО) Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН вблизи с. Торы.

Используемые данные

При анализе пространственно-временных вариаций АОТ на территории Байкальского региона были использованы спутниковые данные радиометра MODIS спутника Aqua с пространственным разрешением 3 км в пикселе, продукт MYD04_3K, коллекция 6,1 (https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K) за период 2005–2019 гг. на длине волны 0,55 мкм.

Анализ проводился в шести пунктах наблюдения: с. Торы (51,78° с.ш., 103° в.д.), пос. Большие Коты (51,91° с.ш., 105,06° в.д.), г. Бабушкин (51,83° с.ш., 106,06° в.д.), пос. Узурь (53,31° с.ш., 107,73° в.д.), дер. Сарма (53,08° с.ш., 106,83° в.д.) и с. Максимиха (53,25° с.ш., 108,73° в.д.). Данные пункты выбраны исходя из того, что в них проводились экспедиционные измерения характеристик аэрозоля. При извлечении спутниковых данных в указанных пунктах использовалось пространственное окно 0,1×0,1°. На *рис. 1* показано пространственное распределение средних годовых значений $\tau_{0,55}^a$ по данным измерений MODIS за 2019 г., а также обозначены пункты наблюдений. Аномально высокие значения АОТ северо-восточнее с. Торы, которые, вероятнее всего, связаны с орографическими особенностями данной местности (горная система Восточный Саян), в настоящей работе не рассматриваются и будут исследованы в дальнейшем.

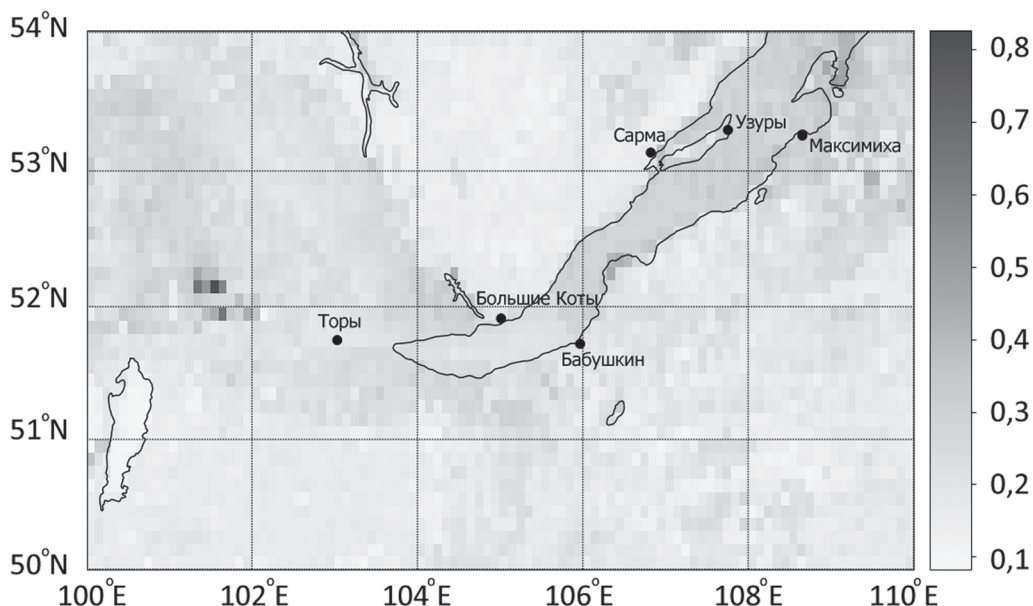


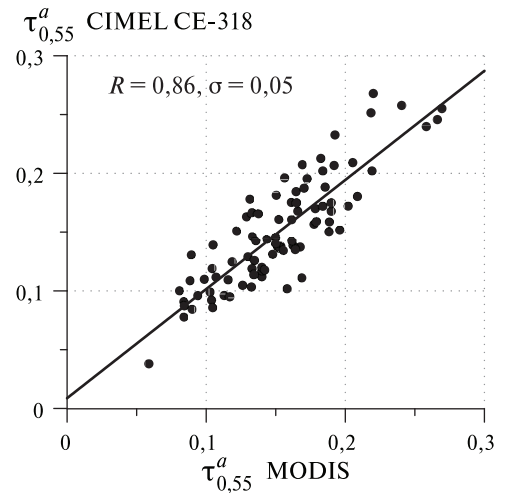
Рис. 1. Пространственное распределение средних годовых значений $\tau_{0,55}^a$ по данным измерений MODIS за 2019 г.

Было проведено сопоставление спутниковых данных MODIS с результатами наземных измерений $\tau_{0,55}^a$ солнечным фотометром CIMEL-318 (уровень 2), входящим в глобальную сеть AERONET, в ГО ИСЗФ СО РАН (с. Торы). Сравнивались многолетние среднемесячные значения АОТ на длине волны 0,55 мкм. Так как в фотометре CIMEL-318 нет спектрального канала 0,55 мкм, то для сравнения с данными MODIS были использованы интерполированные значения $\tau_{0,55}^a$, рассчитанные по формуле:

$$\tau_{0,55}^a = \tau_{0,50}^a \left(\frac{0,55}{0,50} \right)^{-\alpha(440-675)}$$

На *рис. 2* (см. с. 221) представлен график сопоставления многолетних среднемесячных значений $\tau_{0,55}^a$ по данным спутниковых и наземных измерений за 2005–2019 гг.

Рис. 2. Сопоставление среднемесячных значений $\tau_{0,55}^a$ по данным спутниковых (MODIS) и наземных (CIMEL-318) измерений в ГО ИСЗФ СО РАН (с. Торы) за 2005–2019 гг.



Сопоставление двух типов данных показало хорошее согласие для АОТ атмосферы: коэффициент корреляции — 0,86 и среднеквадратичное отклонение — 0,05. На основе проведенного сравнения сделан вывод о соответствии спутниковых данных заявленному уровню точности (Remer et al., 2005) (коэффициент корреляции — 0,64 и среднеквадратичное отклонение — 0,06) и целесообразности использования многолетних среднемесячных значений АОТ для оценки пространственно-временных вариаций АОТ атмосферы в Байкальском регионе.

Межгодовые вариации АОТ атмосферы

В настоящее время основным фактором, влияющим на многолетнюю изменчивость АОТ атмосферы, считаются крупные взрывные вулканические извержения (Bryson, Goodman, 1980). Следующим по значимости фактором становятся массовые лесные пожары (Сакерин и др., 2008; Chubarova et al., 2012; Sitnov et al., 2013; Zhuravleva et al., 2017) в бореальной зоне (в том числе в Байкальском регионе), которые участились в последние годы.

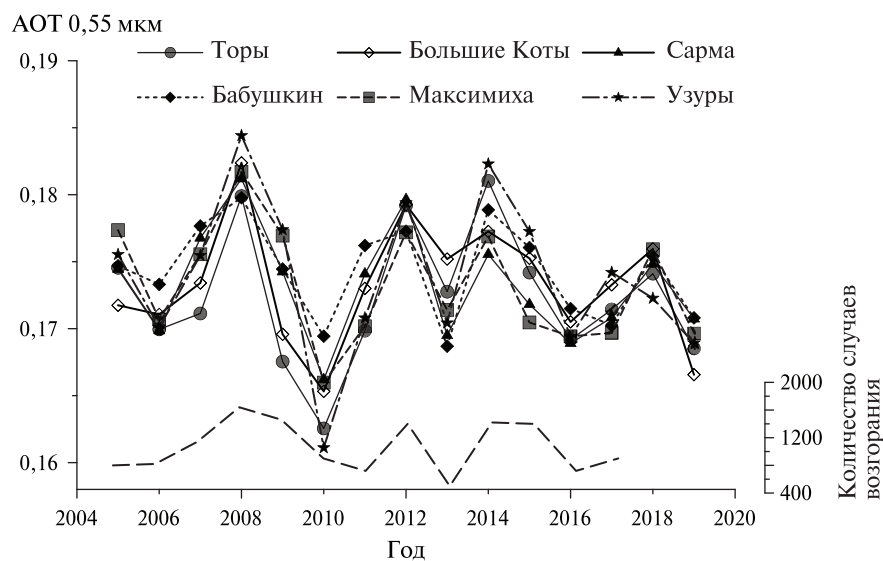


Рис. 3. Межгодовая изменчивость АОТ для шести пунктов наблюдения за период 2005–2019 гг. Прямой линией показан линейный тренд; жирной пунктирной линией — количество случаев возгорания леса в год

На рис. 3 показаны среднегодовые значения $\tau_{0,55}^a$ для шести пунктов наблюдений за период 2005–2019 гг. Из рисунка видно, что во всех районах наблюдается одинаковый характер изменения замутнения атмосферы: максимумы АОТ — в 2008, 2012 и 2014 гг. и минимумы — в 2013 и 2016 гг. с абсолютным минимумом в 2010 г. Данные результаты качественно совпадают с ранее полученными в работе (Taschilin et al., 2018), где рассматривались межгодовые вариации АОТ на длине волны 0,5 мкм по данным фотометра CIMEL-318 в ГО ИСЗФ СО РАН.

В табл. 1 представлены средние многолетние значения АОТ по данным MODIS, рассчитанные по среднемесячным значениям за период 2005–2019 гг. Среднее многолетнее значение АОТ для Байкальского региона (0,17) оказалось близко к среднегодовому глобальному значению АОТ (0,16), полученному по спутниковым данным (MODIS, TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), AVHRR (Advanced Very-High-Resolution Radiometer)) (Kinne, Lohmann, 2003).

Таблица 1. Средние многолетние значения АОТ за период 2005–2019 гг.

Данные	Торы	Бабушкин	Большие Коты	Максимиха	Сарма	Узуры
Максимальные	0,181	0,180	0,182	0,182	0,181	0,184
Минимальные	0,163	0,169	0,165	0,166	0,166	0,161
Средние	0,172	0,174	0,173	0,173	0,173	0,174

Для рассматриваемого 15-летнего периода наблюдается постепенное уменьшение замутнения атмосферы. На рис. 3 прямой линией показан линейный отрицательный тренд $\tau_{0,55}^a$ с общей тенденцией уменьшения на 0,034 при среднем значении 0,173 (уравнение линейного тренда $y = -0,00035x + 0,87428$, $R^2 = 0,129$). Подобный тренд получен в работе (Плахина и др., 2009), в которой очищение атмосферы от аэрозоля связывают с отсутствием крупных вулканических извержений и уменьшением антропогенных (промышленных) эмиссий.

Была проведена оценка взаимосвязи вариаций средних многолетних значений $\tau_{0,55}^a$ в исследуемых пунктах наблюдений. Из данных табл. 2 видно, что на изучаемой территории наблюдается достаточно высокая корреляция АОТ атмосферы. Это свидетельствует об общих процессах изменчивости АОТ в Байкальском регионе. Максимальная корреляция (0,905 и 0,9) отмечается в пунктах наблюдений Торы и Большие Коты, Максимиха и Сарма. По мере увеличения расстояния между пунктами корреляция снижается. Пункты наблюдения Торы и Большие Коты, Максимиха и Сарма взаимно располагаются примерно на одинаковой широте. В работе (Исследование..., 2012) отмечается факт уменьшения значений АОТ с ростом широты, по долготе же эти изменения невелики. Из табл. 1 следует, что значения АОТ уменьшаются с юга на север примерно со средним градиентом $\Delta\tau = 0,002...0,001$ на градус широты. Это согласуется с результатами работы (Абакумова, Горбаренко, 2008), в которой широтное уменьшение $\tau_{0,55}^a$ варьируется в диапазоне от 0,002 в январе до 0,004 в июле.

Таблица 2. Коэффициенты взаимной корреляции вариаций АОТ в пунктах наблюдений

Пункт наблюдения	Торы	Бабушкин	Большие Коты	Максимиха	Сарма	Узуры
Торы	1	0,701	0,905	0,738	0,755	0,854
Бабушкин		1	0,687	0,765	0,874	0,799
Большие Коты			1	0,702	0,774	0,801
Максимиха				1	0,900	0,846
Сарма					1	0,845

В работе (Латышева и др., 2019) был проведён анализ характеристик лесных пожаров на территории Байкальского региона с использованием данных спутникового мониторинга ВЕГА-PRO за 2002–2017 гг. Один из результатов данного анализа в виде количества случаев возгорания леса за год представлен жирной пунктирной линией на рис. 3. Как видно из рисунка, пики количества случаев возгорания в 2008, 2012 и 2014 гг. совпадают с периодами максимального замутнения атмосферы, что подтверждает определяющее влияние лесных пожаров (количество и интенсивность) на формирование межгодовой изменчивости АОТ в исследуемый период.

Сезонные вариации среднемесячных значений АОТ

На рис. 4 показан средний многолетний годовой ход $\tau_{0,55}^a$ за период 2005–2019 гг.

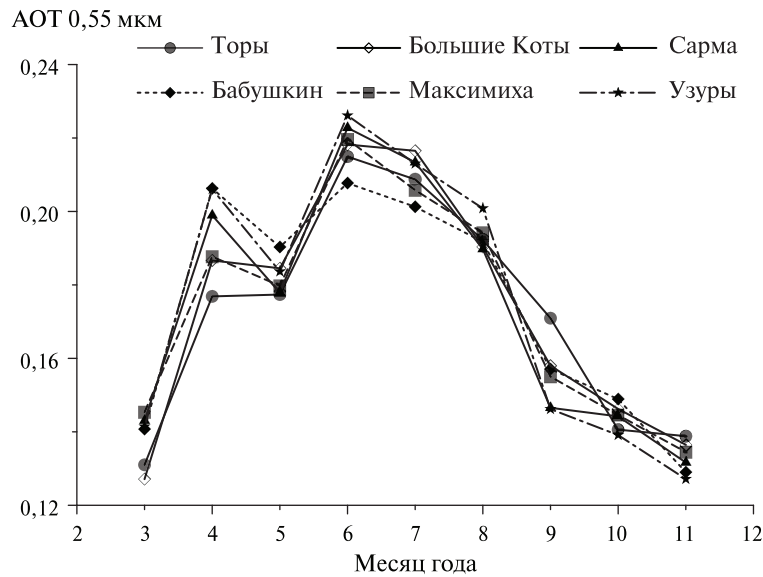


Рис. 4. Средний многолетний годовой ход АОТ для шести пунктов наблюдений по данным MODIS для периода 2005–2019 гг. (март – ноябрь)

Зимние месяцы не анализировались из-за высокого альbedo подстилающей поверхности. Характер годового хода АОТ, полученного по спутниковым данным MODIS, качественно согласуется с результатами ранее проведённых наземных измерений в ГО ИСЗФ СО РАН (Михалев, Тащилин, 2009).

Общей закономерностью внутригодовой изменчивости АОТ в шести пунктах наблюдений выступает наличие первого максимума в апреле, локального минимума в мае, второго максимума в июне и минимума в сентябре – ноябре. Относительное изменение $\tau_{0,55}^a$ от июня к ноябрю составляет в среднем более 60 %, что хорошо согласуется с результатами работы (Плахина и др., 2009), в которой увеличение АОТ в весенне-летний период относительно минимальных значений в осенне-зимний период достигает 60–80 %. Проанализируем весенне-летние максимумы и минимум изменчивости АОТ в Байкальском регионе. Апрельский максимум может быть обусловлен активизацией фотохимических процессов образования вторичного (мелкодисперсного) аэрозоля, высвобождением аэрозольного материала при таянии снега, повышенной эмиссией грубодисперсного аэрозоля с оголённой почвы, а также дымовым аэрозолем. Согласно данным работы (Латышева и др., 2019), первые пожары в Байкальском регионе возникают в апреле, когда отмечается минимальная относительная влажность воздуха, связанная с наименьшим количеством атмосферных осадков и резким повышением температуры воздуха. Локальный минимум АОТ в мае можно связать с образованием свежего растительного покрова, а также с увеличением уровня осадков, которые вымывают аэрозоль, снижают вероятность лесных пожаров и приводят к понижению мутности атмосферы. Сочетание высокой температуры с низкой относительной влажностью воздуха в июне приводит к возникновению суховея и засух, которые способствуют повышению пожароопасности и, как следствие, увеличению уровня АОТ в июне. Во вторую половину лета (июль – август) резко усиливается циклоническая деятельность, которая приводит к увеличению относительной влажности и количества осадков (Заяханов и др., 2010).

Таким образом, Байкальский регион относится к группе регионов, для которых отмечается сезонный ход замутнения атмосферы с максимумом в весенне-летний и минимумом в осенне-зимний периоды.

Заключение

Проведённое сопоставление спутниковых данных MODIS с результатами наземных измерений солнечным фотометром CIMEL-318 показало хорошее согласие для АОТ атмосферы: коэффициент корреляции — 0,86 и среднеквадратичное отклонение — 0,05. Сделан вывод о соответствии спутниковых данных заявленному уровню погрешности (Remer et al., 2005) и целесообразности использования многолетних среднемесячных значений АОТ для оценки пространственно-временных вариаций АОТ атмосферы.

Анализ пространственно-временных вариаций АОТ атмосферы в Байкальском регионе позволил выявить следующие особенности. Межгодовая изменчивость АОТ в основном обусловлена влиянием лесных пожаров и имеет одинаковый характер во всех районах: максимальные замутнения атмосферы наблюдались в 2008, 2012 и 2014 гг., минимальные — в 2010, 2013 и 2016 гг. Среднее многолетнее значение АОТ в Байкальском регионе (0,17) близко к среднегодовому глобальному значению АОТ (0,16), полученному по спутниковым данным (MODIS, TOMS, AVHRR) (Chubarova et al., 2012). Для рассматриваемого 15-летнего периода наблюдается постепенное уменьшение замутнения атмосферы: выявлен линейный отрицательный тренд $\tau_{0,55}^a$ с общей тенденцией уменьшения на 0,034 при среднем значении 0,173. Отмечается факт уменьшения АОТ с ростом широты с градиентом $\Delta\tau = 0,002...0,001$ на градус широты.

Средний сезонный ход АОТ в шести пунктах наблюдений характеризуется весенним (апрель) и летним (июль) максимумами и низкими осенними значениями АОТ. От июня к ноябрю спад среднемесячных значений $\tau_{0,55}^a$ составляет более 60 %.

Исследование выполнялось при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-29-05047) и крупного проекта Министерства науки высшего образования «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории» (грант № 075-15-2020-787).

Литература

1. Абакумова Г. М., Горбаренко Е. В. Прозрачность атмосферы в Москве за последние 50 лет и её изменения на территории России. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 192 с.
2. Байкова И. М. Особенности многолетнего изменения коэффициента прозрачности атмосферы и составляющих солнечной радиации в Сибири и на Дальнем Востоке в 1967–1986 годах // Метеорология и гидрология. 1998. № 1. С. 29–35.
3. Жданова Е. Ю., Хлестова Ю. О., Чубарова Н. Е. Тренды характеристик атмосферного аэрозоля в Москве по данным многолетних измерений сети AERONET // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 443–448.
4. Заяханов А. С., Жамсуева Г. С., Нагуслаев С. А., Цыдыпов В. В., Сакерин С. М., Кабанов Д. М., Тащилин М. А. Результаты исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в Байкальском регионе // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 6. С. 466–470.
5. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / под ред. Сакерина С. М. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 484 с.
6. Латышева И. В., Макаренко Е. Л., Максютова Е. В. Климатические и циркуляционные факторы лесных пожаров на территории Байкальского региона // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы конф. Иркутск, 5–7 июня 2019. Иркутск, 2019. С. 473–485.
7. Михалев А. В., Тащилин М. А. Аэрозольная оптическая толщина атмосферы и ее вариации в регионе Восточной Сибири (Тункинская долина) в 2004–2008 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 6. С. 575–578.
8. Плахина И. Н., Махоткина Е. Л., Панкратова Н. В. Вариации аэрозоля в толще атмосферы по данным российской актинометрической сети (1976–2006 гг.) // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 489–500.
9. Сакерин С. М., Горбаренко Е. В., Кабанов Д. М. Особенности многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщи атмосферы и оценки влияния различных факторов // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 7. С. 625–631.

10. Bryson R. A., Goodman B. M. Volcanic Activity and Climatic Changes // Science. 1980. V. 207. P. 1041–1044.
11. Chubarova N., Nezval Ye., Sviridenkov M., Smirnov A., Slutsker I. Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // Atmospheric Measurement Techniques. 2012. V. 5. P. 557–568.
12. Chubarova N. Y., Poliukhov A. A., Gorlova I. D. Long-term variability of aerosol optical thickness in Eastern Europe over 2001–2014 according to the measurements at the Moscow MSU MO AERONET site with additional cloud and NO₂ correction // Atmospheric Measurement Techniques. 2016. V. 9. No. 2. P. 313–334.
13. Kinne S., Lohmann U. Monthly averages of aerosol properties: A global comparison among models satellite data and AERONET ground data // J. Geophysical Research. 2003. V. 108. Iss. D20. Art. No. 4634. 42 p. DOI: 10.1029/2001JD001253.
14. Li J., Carlson B. E., Dubovik O., Lacis A. A. Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. V. 14. No. 22. P. 12271–12289.
15. Remer L. A., Kaufman Y. J., Tanre D., Mattoo D., Chu D. A., Martins J. V., Li R. R., Ichoku C., Levy R. C., Kleidman R. G., Eck T. F., Vermote E., Holben B. N. The MODIS aerosol algorithm, products and validation // J. Atmospheric Sciences. 2005. V. 62. P. 947–973.
16. Sitnov S. A., Gorchakov G. I., Sviridenkov M. A., Gorchakova I. A., Karpov A. V., Kolesnikova A. B. Aerospace monitoring of smoke aerosol over the European part of Russia in the period of massive forest and peatbog fires in July – August of 2010 // Atmospheric and Oceanic Optics. 2013. V. 26. No. 4. P. 265–280.
17. Tashchilin M. A., Mikhalev A. V., Kabanov D. M. Variations of atmospheric aerosol optical depth in the Tunka valley during 2004–2017 // 24th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Proc. SPIE. 2018. V. 10833. P. 108334M1-5. DOI: 10.1117/12.2504336.
18. Zhuravleva T., Kabanov D., Nasrtdinov I., Russkova T., Sakerin S., Smirnov A., Holben B. Radiative characteristics of aerosol under smoke mist conditions in Siberia during summer 2012 // Atmospheric Measurement Techniques. 2017. V. 10. P. 179–198.

Spatio-temporal variations of the aerosol optical depth in the Baikal region

M. A. Tashchilin¹, I. P. Yakovleva¹, S. M. Sakerin²

¹ Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia
E-mail: miketash@iszf.irk.ru

² Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk 634021, Russia
E-mail: sms@iao.ru

The paper considers the spatial-temporal distribution features and seasonal variability of atmospheric aerosol optical depth (AOD) in the spectral range of 0.55 μm in the Baikal region according to long-term data (2005–2019) of satellite observations (MODIS/Aqua). The satellite AOD values are compared with the AERONET observation results at the Geophysical Observatory of the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS. It is shown that the interannual variability of AOD is mainly due to the impact of forest fires and has the same character: the maximum atmospheric turbidity was observed in 2008, 2012, and 2014, and the minimum in 2010, 2013, and 2016. A decrease in AOD with an increase in latitude with a gradient of $\Delta\tau = 0.002\dots 0.001$ per degree of latitude is noted. The average seasonal AOT variations at six observation points are characterized by spring (April) and summer (July) maximums and low autumn AOD values. From June to November, the decline in average monthly AOD values is more than 60 %.

Keywords: aerosol optical depth, AOD, satellite monitoring, AERONET, MODIS

Accepted: 25.02.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-219-226

References

1. Abakumova G. M., Gorbarenko E. V., *Prozrachnost' atmosfery v Moskve za poslednie 50 let i ee izmeneniya na territorii Rossii* (The transparency of the atmosphere in Moscow over the past 50 years and its changes on the territory of Russia), Moscow: Izd. LKI, 2008, 192 p.
2. Baikova I. M., Osobennosti mnogoletnego izmeneniya koeffitsienta prozrachnosti atmosfery i sostavlyayushchikh solnechnoi radiatsii v Sibiri i na Dal'nem Vostoke v 1967–1986 godakh (Peculiarities of long-term change in the transparency coefficient of the atmosphere and the components of solar radiation in Siberia and the Far East in 1967–1986), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1998, No. 1, pp. 29–35.
3. Zhdanova E. Yu., Khlestova Yu. O., Chubarova N. E., Trendy kharakteristik atmosfernogo aerolya v Moskve po dannym mnogoletnikh izmerenii seti AERONET (Trends in parameters of atmospheric aerosols in Moscow according to long-term AERONET observations), *Optika atmosfery i okeana*, 2019, Vol. 32, No. 6, pp. 443–448.
4. Zayakhanov A. S., Zhamsueva G. S., Naguslaev S. A., Tsydyrov V. V., Sakerin S. M., Kabanov D. M., Tashchilin M. A., Rezul'taty issledovaniy aerolya opticheskoi tolshchi atmosfery v Baikalskom regione (The results of investigation of the aerosol optical thickness of the atmosphere in the Baikal region), *Optika atmosfery i okeana*, 2010, Vol. 23, No. 6, pp. 466–470.
5. Sakerin S. M., *Issledovanie radiatsionnykh kharakteristik aerolya v aziatskoi chasti Rossii* (Study of the radiation characteristics of aerosol in the Asian part of Russia), Tomsk: Izd. IOA SO RAN, 2012, 484 p.
6. Latysheva I. V., Makarenko E. L., Maksyutova E. V., Klimaticheskie i tsirkulyatsionnye faktory lesnykh pozharov na territorii Baikalskogo regiona (Climatic and circulation factors of forest fires in the Baikal region), *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii* (Current Trends and Prospects for the Development of Hydrometeorology in Russia), Proc. Conf., Irkutsk, 5–7 June, 2019, pp. 473–485.
7. Mikhalev A. V., Tashchilin M. A., Aeroly'naya opticheskaya tolshcha atmosfery i ee variatsii v regione Vostochnoi Sibiri (Tunkinskaya dolina) v 2004–2008 gg. (Aerosol optical depth and its variations in the eastern Siberia region (Tunka valley) in 2004–2008), *Optika atmosfery i okeana*, 2009, Vol. 22, No. 6, pp. 575–578.
8. Plakhina I. N., Makhotkina E. L., Pankratova N. V., Variations in the atmospheric aerosol optical depth from the data obtained at the Russian actinometric network in 1976–2006, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2009, Vol. 45, No. 4, pp. 456–466.
9. Sakerin S. M., Gorbarenko E. V., Kabanov D. M., Osobennosti mnogoletnei izmenchivosti aeroly'noi opticheskoi tolshchiny atmosfery i otsenki vliyaniya razlichnykh faktorov (Peculiarities of many-year variations of atmospheric aerosol optical depth and estimates of influence of different factors), *Optika atmosfery i okeana*, 2008, Vol. 21, No. 7, pp. 625–631.
10. Bryson R. A., Goodman B. M., Volcanic Activity and Climatic Changes, *Science*, 1980, Vol. 207, pp. 1041–1044.
11. Chubarova N., Nezval Ye., Sviridenkov M., Smirnov A., Slutsker I., Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, Vol. 5, pp. 557–568.
12. Chubarova N. Y., Poliukhov A. A., Gorlova I. D., Long-term variability of aerosol optical thickness in Eastern Europe over 2001–2014 according to the measurements at the Moscow MSU MO AERONET site with additional cloud and NO₂ correction, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, Vol. 9, No. 2, pp. 313–334.
13. Kinne S., Lohmann U., Monthly averages of aerosol properties: A global comparison among models satellite data and AERONET ground data, *J. Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, Issue D20, Art. No. 4634, 42 p., DOI: 10.1029/2001JD001253.
14. Li J., Carlson B. E., Dubovik O., Laci A. A., Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, Vol. 14, No. 22, pp. 12271–12289.
15. Remer L. A., Kaufman Y. J., Tanre D., Mattoo D., Chu D. A., Martins J. V., Li R. R., Ichoku C., Levy R. C., Kleidman R. G., Eck T. F., Vermote E., Holben B. N., The MODIS aerosol algorithm, products and validation, *J. Atmospheric Sciences*, 2005, Vol. 62, pp. 947–973.
16. Sitnov S. A., Gorchakov G. I., Sviridenkov M. A., Gorchakova I. A., Karpov A. V., Kolesnikova A. B., Aerospace monitoring of smoke aerosol over the European part of Russia in the period of massive forest and peatbog fires in July–August of 2010, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2013, Vol. 26, No. 4, pp. 265–280.
17. Tashchilin M. A., Mikhalev A. V., Kabanov D. M., Variations of atmospheric aerosol optical depth in the Tunka valley during 2004–2017, *24th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Proc. SPIE*, 2018, Vol. 10833, 108334M1–5, DOI: 10.1117/12.2504336.
18. Zhuravleva T., Kabanov D., Nasrtdinov I., Russkova T., Sakerin S., Smirnov A., Holben B., Radiative characteristics of aerosol under smoke mist conditions in Siberia during summer 2012, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, Vol. 10, pp. 179–198.