

## Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы на территории Поволжья, Урала и Западной Сибири

С.М. Сакерин<sup>1</sup>, С.Ю. Андреев<sup>1</sup>, Т.В. Бедарева<sup>1</sup>, Д.М. Кабанов<sup>1</sup>,  
В.А. Поддубный<sup>2</sup>, А.П. Лужецкая<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Институт промышленной экологии УрО РАН  
620219, г. Екатеринбург, ГСП-594, ул. С. Ковалевской, 20а

Поступила в редакцию 27.04.2012 г.

Рассматриваются особенности пространственного распределения и сезонной изменчивости аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы в области спектра 0,55 мкм на территории Поволжья, Урала и Западной Сибири по многолетним данным спутниковых наблюдений (MODIS/TERRA и AQUA). Проводится сопоставление спутниковых значений АОТ для отдельных районов Среднего Урала с результатами наблюдений AERONET в районе Коуровской астрономической обсерватории. Показано, что с апреля по декабрь годовой ход АОТ во всех районах одинаков: максимумы замутнения — весной и летом (август), минимумы — в июне и осенью. В среднем более высокие значения АОТ наблюдаются на юге Западной Сибири и Поволжья, а минимальные — на Северном Урале. Отмечается высокая взаимосвязь вариаций месячных значений АОТ в отдельных районах.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, аэрозольная оптическая толщина, пространственное распределение, годовой ход; satellite monitoring, aerosol optical depth, spatial distribution, annual behavior.

### Введение

В последнее десятилетие при анализе изменчивости аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы используются пространственные данные спутниковых измерений в сочетании с результатами наземного мониторинга, проводимого в отдельных районах. Для центральной части европейской территории России (53–59° с.ш., 30–44° в.д.) пространственно-временная изменчивость АОТ рассматривалась в работах [1, 2]. В наших публикациях [3–5] обсуждались особенности годового хода АОТ в нескольких регионах азиатской части России на основе результатов спутниковых (MODIS) и AERONET [6] наблюдений. В настоящей статье продолжен анализ АОТ атмосферы в районах, которые не были рассмотрены в [1–5], — Урал с прилегающими территориями на западе и востоке (43–83° в.д.). В отличие от [1, 2], целью наших исследований являлись не маломасштабные (локальные) особенности изменчивости полей АОТ, а закономерности годового хода на достаточно крупных территориях. Поэтому на спутниковых

картах сначала были выделены районы с квазиоднородным распределением аэрозоля и для них проводился сравнительный анализ средних значений АОТ для различных периодов. При определении границ районов, как и в [3–5], мы старались исключить участки, где по спутниковым данным наблюдаются локальные аномалии АОТ атмосферы.

В качестве исходной информации использовались месячные значения АОТ на длине волны 0,55 мкм ( $\tau_{0,55}^a$ ), полученные в период с 2001 по 2011 г. спектро радиометрами MODIS с пространственным разрешением 1° [7]. Средние значения  $\tau_{0,55}^a$  для отдельных месяцев и сезонов рассчитывались по данным двух спутников (TERRA и AQUA), представленным в коллекции 5.1 [8].

Общая картина пространственной изменчивости средних летних значений АОТ на анализируемой территории иллюстрируется на рис. 1 (цветная вклейка).

Качественно аналогичные распределения  $\tau_{0,55}^a$  наблюдаются и в отдельные месяцы года. Зимние месяцы не анализировались из-за малочисленности данных и большей погрешности определения АОТ над снежной поверхностью [5]. Для определения количественных характеристик АОТ были выделены крупные территории со следующими условными (и сокращенными) названиями: Приуралье (ПУ), Северный Урал (СУ), Северное и Южное Поволжье (СП и ЮП), юг Западной Сибири (ЮЗС), Западная Сибирь (ЗС).

\* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Сергей Юрьевич Андреев (serga@iao.ru); Татьяна Владимировна Бедарева (btv@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Василий Алексеевич Поддубный (Basil@ecko.uran.ru); Анна Павловна Лужецкая.

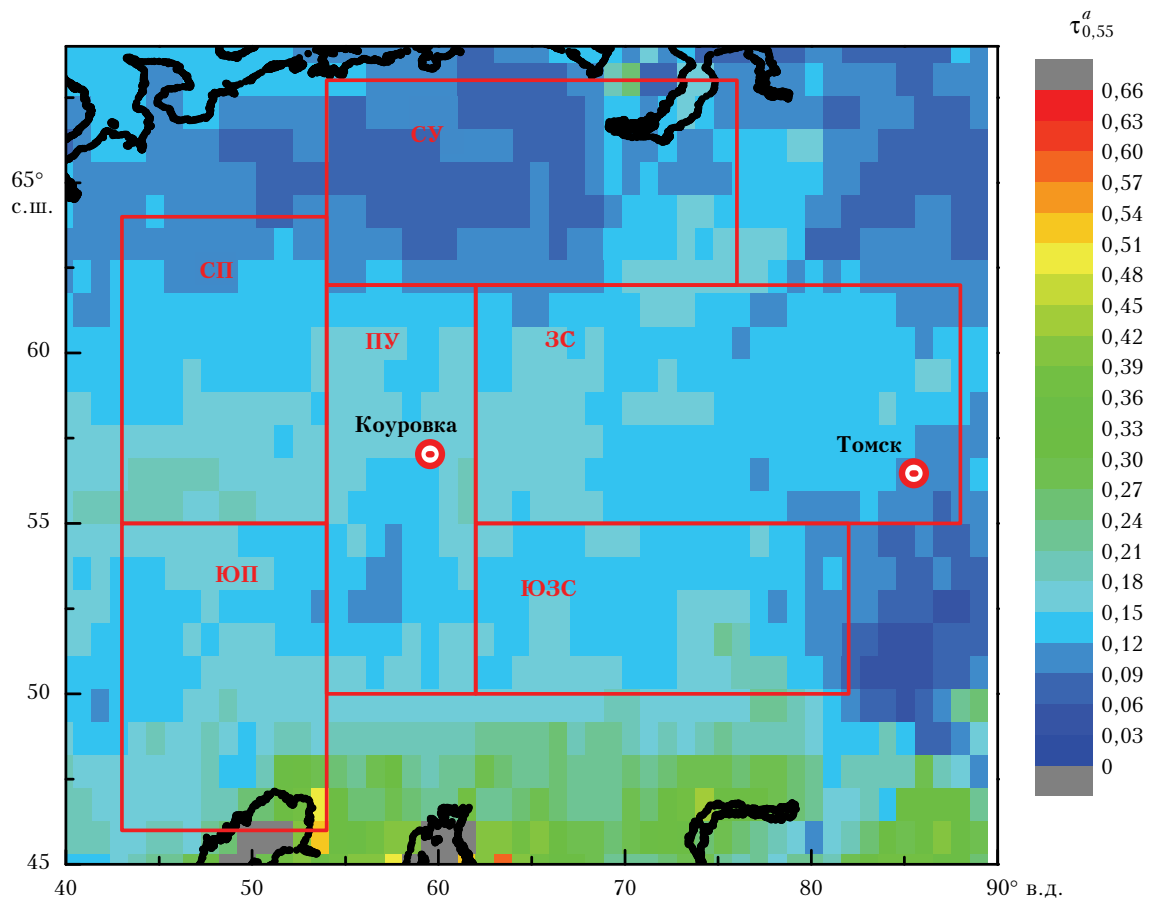


Рис. 1. Пространственное распределение средних летних значений  $\tau_{0.55}^a$  по данным измерений спутников TERRA и AQUA (прямоугольниками обозначены анализируемые районы, кружками — местоположение станций AERONET наблюдений)

## 1. Широтная зависимость АОТ атмосферы

Анализ карт распределений  $\tau_{0,55}^a$  показал, что максимальные замутнения на всей территории наблюдаются весной, минимальные осенью. Во все месяцы и в целом по году прослеживается уменьшение АОТ с ростом широты, а изменения с долготой невелики. Этот факт отмечался и для районов Сибири [4, 5], однако не анализировался сам характер широтной зависимости АОТ. Выяснение данного вопроса необходимо для определения географических границ разрабатываемых региональных моделей. С этой целью были рассмотрены широтные изменения АОТ в Западной Сибири (64–82° в.д.) и на Урале (53–62° в.д.). Протяженность анализируемых территорий по широте составляет 24° – от 48 до 72° с.ш. Расчеты выполнялись для центральных месяцев лета и осени – в периоды, когда спутниковые данные наиболее достоверны и согласуются с результатами наземных измерений.

На рис. 2 приведены отдельные точки и сглаженные широтные зависимости  $\tau_{0,55}^a(\varphi)$ , полученные

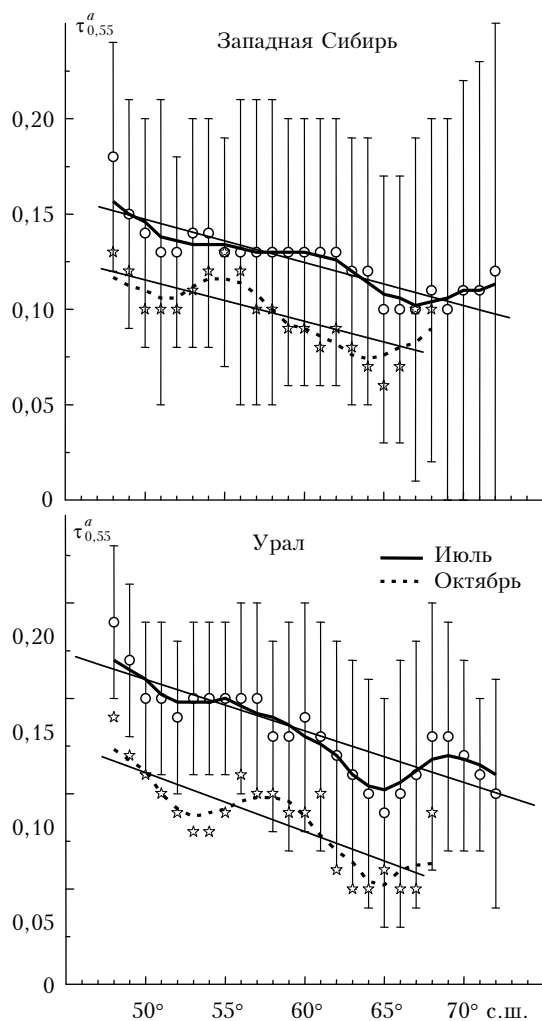


Рис. 2. Широтные зависимости АОТ атмосферы в Западной Сибири и на Урале

путем скользящего усреднения значений АОТ с окном  $\varphi = 5^\circ$ .

Из приведенных данных следует, что АОТ летом и осенью уменьшается с юга на север примерно с одинаковым средним градиентом  $\Delta\tau/\Delta\varphi = 0,002 \div 0,003$  на градус широты. Указанное широтное изменение аэрозольного замутнения согласуется с результатами наблюдений на актинометрических станциях России. Например, по данным [9] широтное уменьшение  $\tau_{0,55}^a$  можно оценить величиной от 0,002 в январе до 0,004 в июле.

Некоторые отклонения от линейной широтной зависимости АОТ обусловлены двумя причинами: а) неоднородностями ландшафта и рельефа, которые сложно учесть в спутниковом методе восстановления  $\tau_{0,55}^a$ ; б) неравномерной плотностью расположения антропогенных источников (крупных промышленных зон). Относительная величина отклонений от линейной зависимости  $\tau_{0,55}^a(\varphi)$  на Урале больше, чем в Сибири, и осенью больше, чем летом.

## 2. Годовой ход АОТ в разных районах и сравнение с наземными данными

Для проверки спутниковой информации было проведено сравнение данных наземных AERONET наблюдений в Коуровской астрономической обсерватории УрФУ (вблизи Екатеринбурга) [10] и спутниковых измерений  $\tau_{0,55}^a$  в трех районах Урала: 1) в фоновом районе Коуровской обсерватории (1° × 1°); 2) в городской зоне Екатеринбурга (1° × 1°); 3) более крупной территории Приуралья (50–62° с.ш., 52–62° в.д.). Результаты сравнения показали (рис. 3), что с апреля по ноябрь спутниковые значения  $\tau_{0,55}^a$  в районе Коуровской обсерватории количественно близки к данным для территории Приуралья и в Екатеринбурге. Максимальное отличие месячных значений  $\tau_{0,55}^a$  в отдельных выборках (районах) не превышает 0,04: в Екатеринбурге, в среднем, выше, чем в Коуровке и Приуралье.

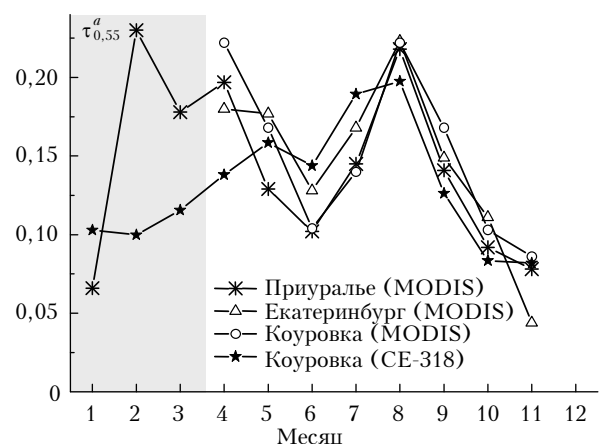


Рис. 3. Сравнение среднемесячных значений  $\tau_{0,55}^a$  по данным наземных и спутниковых измерений в трех районах Урала

Для большинства месяцев спутниковые значения  $\tau_{0,55}^a$  в отдельных районах Урала согласуются с данными AERONET (CE-318) наблюдений в Коуровской обсерватории: различие варьирует в диапазоне 0,01–0,03. То есть результаты наземного мониторинга в локальном районе характеризуют закономерности годового хода АОТ во всем регионе. В зимний период (с января до апреля) наблюдаются большие различия из-за малочисленности и меньшей достоверности спутниковой информации (этот период на рис. 3 обозначен серым фоном).

Кроме того, было обращено внимание, что летний максимум АОТ (август) на Урале существенно выше, чем в соседней Западной Сибири [4, 5, 11]. При более детальном анализе было выяснено, что основной причиной такой аномалии явились массовые лесные пожары августа 2010 г., которые сильно исказили многолетний годовой ход АОТ в большинстве европейских районов России, включая Урал [2, 12 и др.].

Из табл. 1 видно, что в районах, которые подверглись влиянию дымов пожаров – Приуралье, Северное и Южное Поволжье, средние значения  $\tau_{0,55}^a$  в августе увеличились (исказились) на ~0,04 (выделено жирным шрифтом).

Таблица 1

Средние многолетние АОТ в августе и за год с учетом и без учета августа 2010 г.

Период	ЗС	ЮЗС	СУ	ПУ	СП	ЮП
Август (все данные)	0,153	0,176	0,137	<b>0,218</b>	<b>0,22</b>	<b>0,221</b>
Август (без 2010)	0,13	0,159	0,115	<b>0,166</b>	<b>0,154</b>	<b>0,185</b>
«Годовые» (все данные)	0,153	0,164	0,111	<b>0,142</b>	<b>0,145</b>	0,146
«Годовые» (без 2010)	0,151	0,162	0,107	<b>0,135</b>	<b>0,137</b>	0,142

Это повлияло даже на «годовые» значения АОТ атмосферы. По данным наземных наблюдений на Среднем Урале этот же вопрос рассматривался в работе [10]. С учетом вышесказанного, август 2010 г. и зимние месяцы из дальнейшего анализа сезонной изменчивости АОТ были исключены.

Заметим, что «годовые» значения АОТ здесь и далее приведены в кавычках, так как, строго говоря, не являются таковыми. Их расчет проводился без учета зимних месяцев – в зависимости от района по 7–9 мес теплого периода. По этой причине «годовые» АОТ, например в Западной Сибири, оказались немало выше, чем в Поволжье.

Из рис. 4 видно, что общими закономерностями годового хода  $\tau_{0,55}^a$  для всех рассматриваемых регионов являются весеннее снижение АОТ до июня,

вторичный максимум летом (август) и последующий осенний спад АОТ. Общий диапазон сезонного изменения АОТ с апреля по ноябрь составляет ~0,1 в южных районах и 0,18 на Северном Урале. Обращают на себя внимание более высокие апрельские значения АОТ в Сибири и на Северном Урале, возможно обусловленные малым количеством данных.

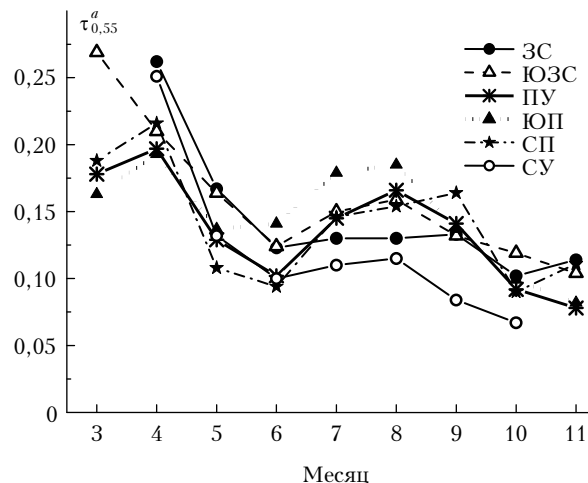


Рис. 4. Годовой ход АОТ атмосферы в различных регионах

Отличие среднемесячных значений  $\tau_{0,55}^a$  в соседних регионах сравнительно невелико – до 0,05. Чтобы сопоставить средний уровень замутнения между районами, был выделен период с мая по ноябрь, где спутниковая информация более достоверна и есть данные для всех районов. Расчеты показали, что многолетний средний уровень АОТ среди рассмотренных районов – самый высокий на юге Западной Сибири и Поволжья, а наиболее чистая атмосфера – на Северном Урале (общее различие около 30%). Более детально распределение среднего аэрозольного замутнения по районам приведено в табл. 2.

### 3. Межгодовые колебания АОТ и корреляция между районами

На рис. 5 иллюстрируются вариации «годовых» и летних (июнь–август) значений  $\tau_{0,55}^a$  в рассматриваемых регионах. В многолетней изменчивости АОТ наблюдаются осцилляции с периодами от 2 до 5 лет.

Наиболее явно проявились всплески аэрозольного замутнения атмосферы из-за массовых лесных пожаров летом 2002 и 2010 гг., хорошо известные по многим публикациям [12–14 и др.]. Общими для большинства районов являются минимумы АОТ в 2001, 2005, 2011 гг. Наряду с этим в межгодовых колебаниях АОТ в Поволжье и Приуралье есть некоторые

Таблица 2

Многолетний средний уровень АОТ в разных районах для периода май–ноябрь

Данные	ЗС	ЮЗС	СУ	ПУ	СП	ЮП
Общий массив (май–ноябрь)	0,132	0,138	0,105	0,130	0,133	0,142
Без массовых пожаров 2002, 2010 гг.	0,125	0,131	0,098	0,115	0,114	0,131

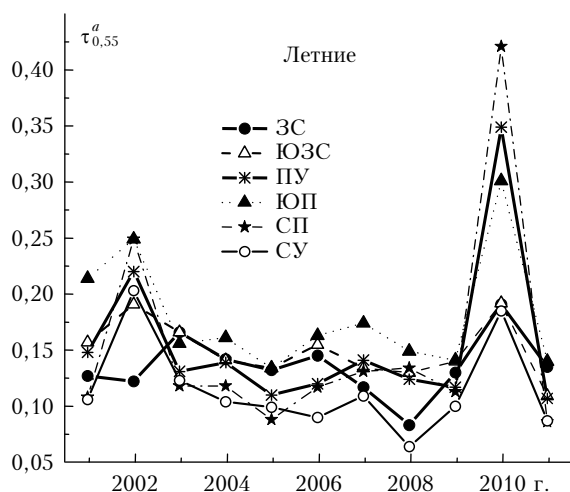
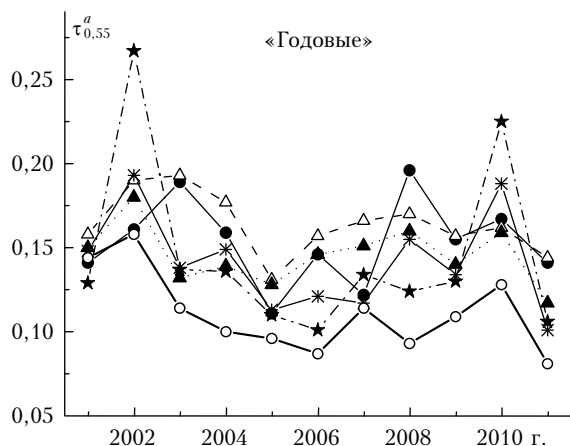


Рис. 5. Многолетняя изменчивость «годовых» и летних значений  $\tau_{0,55}^a$  в разных регионах

отличия от колебаний в Западной Сибири и на Северном Урале. Например, в летних значениях  $\tau_{0,55}^a$  в Западной Сибири не проявилось влияние лесных пожаров в европейской части России в 2002 г. Абсолютный минимум АОТ в районах ЗС и СУ, в отличие от других районов, наблюдался в 2008 г.

По аналогии с [5], была оценена взаимосвязь вариаций месячных значений  $\tau_{0,55}^a$  в отдельных районах. Из данных табл. 3 видно, что на всей территории наблюдается достаточно высокая корреляция АОТ атмосферы.

Таблица 3

Матрица коэффициентов взаимной корреляции вариаций АОТ в отдельных районах

Район	ЗС	ЮЗС	СУ	ПУ	ЮП	СП
ЗС	1,00	0,76	0,58	0,64	0,54	0,63
ЮЗС		1,00	0,61	0,78	0,75	0,73
СУ			1,00	0,69	0,66	0,67
ПУ				1,00	<b>0,92</b>	<b>0,96</b>
ЮП					1,00	<b>0,87</b>

Это свидетельствует об общих механизмах (процессах) изменчивости АОТ в рассматриваемых районах. Максимальная корреляция (0,87–0,96) харак-

терна для регионов Приуралья, Северного и Южного Поволжья. По мере увеличения расстояния между районами корреляция снижается. Самая низкая, но статистически значимая взаимосвязь АОТ наблюдается между наиболее удаленными районами ЗС и ЮП.

Понятно, что причинами корреляции межмесячных вариаций аэрозольного замутнения в разных районах являются единообразие характера годового хода  $\tau_{0,55}^a$  и влияние общей циркуляции атмосферы. Соответствующий анализ взаимосвязи АОТ с различными индексами циркуляции атмосферы будет представлен в отдельной публикации.

## Заключение

Анализ пространственно-временной изменчивости АОТ атмосферы на территории Поволжья, Урала, Западной Сибири позволил выявить следующие особенности и закономерности.

1. Для большинства месяцев спутниковые значения  $\tau_{0,55}^a$  в отдельных районах Урала согласуются с результатами наземных AERONET измерений в районе Коуровской астрономической обсерватории, а в период с января по апрель наблюдаются большие различия из-за погрешности спутниковой информации.

2. Пространственное распределение аэрозольного замутнения в регионах Урала и Западной Сибири характеризуется, в основном, уменьшением АОТ с ростом широты, а изменения с долготой невелики. Летом и осенью средний градиент уменьшения АОТ с юга на север составляет 0,002–0,003 на градус широты. Средний уровень АОТ в теплый период (май–ноябрь) на юге Западной Сибири и Поволжья на ~30% больше, чем на Северном Урале.

3. Годовой ход аэрозольного замутнения в регионах Урала, Поволжья и Западной Сибири характеризуется основным весенним, вторичным летним максимумом АОТ и пониженными значениями осенью и в июне. Абсолютный и относительный диапазон сезонного изменения АОТ (апрель–ноябрь) на Северном Урале существенно выше, чем в более южных районах.

4. В межгодовой изменчивости проявляются общие для большинства районов максимумы АОТ в 2002 и 2010 гг. (летние пожары) и минимумы в 2001, 2005, 2011 гг. На всей анализируемой территории наблюдается достаточно высокая корреляция месячных значений  $\tau_{0,55}^a$ , что свидетельствует об общих механизмах изменчивости АОТ (годовой ход и циркуляция атмосферы).

Работа выполнена при финансовой поддержке партнерского интеграционного проекта СО РАН № 25, УрО РАН № 12-С-2-1017 и Государственного контракта № 02.740.11.0674.

1. Ситнов С.А. Пространственно-временная изменчивость оптической толщи аэрозоля над центральной частью европейской территории России по данным спутниковых приборов MODIS // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2011. Т. 47, № 5. С. 634–652.

2. Ситнов С.А. Анализ спутниковых наблюдений аэрозольных оптических характеристик и газовых примесей атмосферы над Центральным районом Российской Федерации в период аномально высоких летних температур и массовых пожаров 2010 г.: взаимосвязь изменчивости загрязнений и метеорологических величин // Оптика атмосфер и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 572–581.
3. Сакерин С.М., Андреев С.Ю., Бедарева Т.В., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Holben V., Smirnov A. Аэрозольная оптическая толщина атмосферы в Дальневосточном Приморье по данным спутниковых и наземных наблюдений // Оптика атмосфер и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 654–660.
4. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / Под ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012 (в печати).
5. Сакерин С.М., Андреев С.Ю., Бедарева Т.В., Кабанов Д.М. Особенности пространственного распределения аэрозольной оптической толщи атмосферы в азиатской части России // Оптика атмосфер и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 484–490.
6. Holben V.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote. Sens. Environ. 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
7. URL: [http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance\\_id=MODIS\\_MONTHLY\\_L3](http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=MODIS_MONTHLY_L3)
8. URL: [http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/\\_docs/Collection\\_051\\_Changes\\_v1.pdf](http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/_docs/Collection_051_Changes_v1.pdf)
9. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В. Прозрачность атмосферы за последние 50 лет и ее изменение на территории России. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 188 с.
10. Поддубный В.А., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И., Береснев С.А., Горда С.Ю., Сакерин С.М. Особенности оптических характеристик атмосферного аэрозоля на среднем Урале // Изв. РАН. Физ. атмосфер и океана. 2012. Т. 48 (в печати).
11. Сакерин С.М., Береснев С.А., Горда С.Ю., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Маркелов Ю.И., Михалев А.В., Николашкин С.В., Панченко М.В., Поддубный В.А., Польшкин В.В., Смирнов А., Тацлин М.А., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С., Холбен Б., Еремина Т.А. Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // Оптика атмосфер и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 566–574.
12. Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Семутникова Е.Г., Чубарова Н.Е., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Емленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Лезина Е.А., Задорожная О.С. Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля задымленной атмосферы Московского региона в 2010 г. // Докл. РАН. 2011. Т. 437, № 5. С. 686–690.
13. Чубарова Н.Е., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шилова О.А. Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмоскovie // Изв. РАН. Физ. атмосфер и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 790–800.
14. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Исаков А.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Лезина Е.А., Пономарева Т.Я., Соколов А.В. Московская дымная мгла 2010 г. Экстремальное аэрозольное и газовое загрязнение воздушного бассейна Московского региона // Оптика атмосфер и океана. 2011. Т. 24, № 6. С. 452–458.

*S.M. Sakerin, S.Yu. Andreev, T.V. Bedareva, D.M. Kabanov, V.A. Poddubnyi, A.P. Luzhetskaya. Spatiotemporal variations in the atmospheric aerosol optical depth on the territory of Povolzhye, Urals, and Western Siberia.*

We consider specific features in the spatial distribution and seasonal variations of the atmospheric aerosol optical depth (AOD) in a wavelength region of 0.55  $\mu\text{m}$  on the territory of Povolzhye, Urals, and Western Siberia according to many-year data of satellite (MODIS/TERRA and AQUA) observations. The satellite values of AOD for particular regions of the Middle Urals are compared with AERONET observations in the region of Kourovka Astronomical Observatory. It is shown that the annual AOD variations from April to December are similar in all regions: with turbidity maxima, observed in spring and summer (August), and with minima in June and fall. On the average, the AOD values are larger in the south of the Western Siberia and Povolzhye and minimal in the Northern Urals. A high interrelation in the monthly AOD variations between individual regions is noted.