

Влияние синоптических факторов на вариации аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири

Д.М. Кабанов¹, Т.Р. Курбангалиев², Т.М. Рассказчикова¹,
С.М. Сакерин¹, О.Г. Хуторова^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Казанский государственный университет

420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

Поступила в редакцию 12.03.2011 г.

На основе результатов многолетних измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы (АОТ) в типичном районе Сибири (Томск) проанализирована ее взаимосвязь с различными синоптическими факторами. Проводится сопоставление средних спектральных зависимостей АОТ для двух типов воздушных масс (континентальный умеренный и арктический воздух) и различных барических образований. Оценивается влияние на АОТ балла облачности и выпадения осадков. Обсуждаются результаты вейвлет-анализа рядов АОТ и общего влагосодержания атмосферы для ряда пунктов наблюдений (станции сети AERONET – Томск, Екатеринбург, Иркутск, Якутск, Уссурийск). Проводятся выявление и сопоставление особенностей синоптических квазипериодических вариаций в различных пунктах измерения.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, общее влагосодержание, синоптические колебания; aerosol optical depth, columnar water vapor, synoptic variability.

Введение

Хорошо известно, что большой вклад в общую изменчивость характеристик атмосферы вносят синоптические и глобальные колебания (по классификации Монина [1]). Указанные вариации обусловлены сменой воздушных масс и барических образований с периодами от суток до нескольких декад. Для ряда характеристик, в частности для аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы, межсуточные вариации превышают другие типы колебаний. Например, в наших исследованиях [2–4 и др.] было показано, что коэффициенты синоптических вариаций АОТ атмосферы достигают 50% и более. Для сравнения отметим, что оценки с помощью коэффициентов вариаций сезонной изменчивости и дневного хода АОТ [5–7] составляют 30–40 и 10–20% соответственно.

Несмотря на сильные межсуточные изменения, количественное описание влияния на АОТ отдельных синоптических факторов затруднено. Это обусловлено случайным характером и сложностью процессов общей циркуляции и атмосферных возмущений. Например, влияние на аэрозольное замутнение типа воздушной массы определяется разной «историей» ее жизни до прихода в район на-

блюдений, включая зависимость от траектории и скорости движения воздуха, интенсивности генерации и стока аэрозоля в разных районах по пути движения и т.д.

Вопросы, связанные с влиянием синоптических факторов на аэрозольное замутнение, рассматривались, например, в работах [8–15]. Авторами [8] было показано, что пространственное распределение характеристик прозрачности атмосферы существенно зависит от образования и режима перемещения синоптических объектов, а внутри барических образований во многом определяется местными факторами [8–11]. В работе [11] приведены также результаты исследования влияния стратификации атмосферы и осадков на аэрозольную оптическую толщину.

Зависимость АОТ атмосферы от типа воздушных масс для нескольких районов Канады рассмотрена в работах [12, 13]. Авторами показано, что существующая классификация воздушных масс позволяет выделять различные уровни замутнения атмосферы. Наибольшие средние значения АОТ соответствуют тропическому воздуху, а наименьшие – арктическому. Например, для пункта Шербрук (Sherbrooke) средние значения $\bar{\tau}_{0,5}^a$ для арктического, континентального и тропического воздуха составляют $0,10 \pm 0,03$; $0,15 \pm 0,05$ и $0,32 \pm 0,10$ соответственно. Различия $\bar{\tau}_{0,5}^a$ между однотипными воздушными массами, отличающимися морским или континентальным происхождением, не столь велики.

* Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Тимур Рафаэльевич Курбангалиев; Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Ольга Германовна Хуторова (olga.khutorova@ksu.ru).

Значимые различия АОТ атмосферы для разных типов воздушных масс подтверждаются результатами исследований в других регионах: [10] – территория США, [8] – полярные районы России.

Естественно, что наиболее выраженное влияние типа воздушной массы на аэрозольное замутнение наблюдается в тех регионах, куда воздушные массы приходят, не успев трансформироваться. Территория Западной Сибири (Томск) расположена в центральной части континента и, как следствие, воздушные массы (особенно тропическая), проникающие сюда, во многом приобретают свойства континентального умеренного воздуха. Изменение АОТ атмосферы в Томске при смене умеренной и арктической воздушных масс на примере непродолжительных измерений представлено в работе [3]. Исследования, выполненные авторами [16], показали, что влияние разных типов воздушных масс проявляется не только на интегральных оптических характеристиках, но и на распределении субмикронного аэрозоля в нижнем 5-километровом слое атмосферы.

В настоящей статье на основе результатов наблюдений в районе Томска в последнее десятилетие представлены количественные характеристики межсуточной изменчивости АОТ и влияние на нее отдельных синоптических факторов. Кроме статистических характеристик обсуждаются результаты вейвлет-анализа рядов АОТ и общего влагосодержания (ОВС) атмосферы, проведенного с целью выявления особенностей синоптических квазипериодических вариаций в различных пунктах измерений.

1. Характеристика экспериментальных данных

Как и в предшествующих работах о годовом и дневном ходе АОТ в районе Томска [5, 6], при анализе синоптической изменчивости использовались результаты измерений многоволновых солнечных фотометров в диапазоне спектра 0,34–4 мкм. Кроме спектральных АОТ на нескольких длинах волн, для летнего и зимнего периодов оценивалась межсуточная изменчивость следующих характеристик: а) параметров α и β формулы Ангрстрема $\tau^a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$, рассчитанных для спектрального интервала 0,44–0,87 мкм; б) грубодисперсной τ^c и мелкодисперсной (для длины волны 0,5 мкм) $\tau_{0,5}^f$ компонент АОТ; в) общего влагосодержания атмосферы W . Более подробно аппаратно-методические вопросы получения данных рассмотрены в [17–19].

Для исследования пространственных различий внутрисезонных колебаний были проанализированы временные ряды $\tau_{0,5}^f$ и ОВС по данным станций сети AERONET: Екатеринбург, Томск, Иркутск, Якутск и Уссурийск (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Селекция результатов измерений АОТ по различным синоптическим ситуациям проводилась

с использованием базы данных синоптических и метеорологических условий в г. Томске, созданной в ИОА СО РАН на основе классификации атмосферных процессов, предложенной в работе [20]. При формировании базы выделение синоптических объектов осуществлялось по приземным и кольцевым картам, а также картам барической топографии. Типы воздушных масс – по географическому признаку их образования. Для уточнения времени прохождения фронтов использовались метеорологические данные, полученные на TOR-станции [21]. Разделение по сезонам производилось с учетом местного климата [22].

Анализ межсуточных вариаций характеристик АОТ и ОВС атмосферы включал оценку влияния основных (для Сибири) типов воздушных масс – континентального умеренного (КУВ) и арктического воздуха (КАВ), а также барических систем – циклонов, антициклонов, ложбин, гребней, малоградиентных полей. При формировании выборок по воздушным массам периоды прохождения атмосферных фронтов были исключены. Количество дней измерений (N_D) и усредненных за 1 ч замеров (N_H) АОТ и ОВС в каждом из перечисленных синоптических образований представлено в табл. 1.

Отметим, что представительность выборок для различных синоптических объектов (табл. 2) не всегда отражает их реальную повторяемость из-за ограничений метода солнечной фотометрии (измерения проводятся только в условиях, когда Солнце не закрыто облаками). Например, относительное количество измерений, выполненных в барических образованиях, характеризующихся повышенным давлением и малооблачной погодой (антициклон, гребень), в сравнении с образованиями пониженного давления (циклон, ложбина) значительно превышает реальную повторяемость данных синоптических объектов в регионе. В большей степени эти различия проявляются в зимний период при низких угловых положениях Солнца.

Для оценки влияния облачности общий массив летних данных АОТ был разделен на три подмассива: малооблачные ситуации (0–3 балла), средние условия (4–7 баллов) и облачность 8 баллов и более (пасмурно или сплошная облачность). Представительность выборки для малооблачных условий составила 1703 среднечасовых спектра АОТ, полученных в течение 329 дней. Для условий средней облачности – 1297 и 428 соответственно. А для сплошной облачности – 1487 и 460.

Для оценки влияния осадков, вымывающих аэрозоль из атмосферы, были отобраны среднечасовые значения АОТ для летнего периода, удовлетворяющие следующим условиям:

- 1) интервал времени между выпадением осадков и измерениями «до» и «после дождя» не должен превышать 2 ч;
- 2) тип воздушной массы и барического поля для каждой «пары» измерений должен оставаться неизменным;
- 3) необходимо отсутствие осадков в течение дня до рассматриваемой ситуации.

Таблица 1

Средние значения, средноквадратические отклонения и модальные значения (в скобках) характеристик АОТ, а также ОВС атмосферы в различных синоптических объектах для летнего и зимнего сезонов (N_D и N_H – количество дней измерений и среднечасовых замеров)

Синоптический объект	$\tau_{0,5}^a$	α	β	$\tau_{0,5}^f$	τ^e	W , г/см ²	N_D	N_H
<i>Лето</i>								
КАВ	0,115 ± 0,053 (0,095)	1,41 ± 0,37 (1,60)	0,044 ± 0,022 (0,035)	0,080 ± 0,042 (0,048)	0,035 ± 0,020 (0,028)	1,480 ± 0,501 (1,60)	246	1188
КУВ	0,143 ± 0,065 (0,115)	1,49 ± 0,40 (1,75)	0,051 ± 0,027 (0,043)	0,100 ± 0,051 (0,070)	0,043 ± 0,024 (0,033)	1,880 ± 0,616 (1,80)	296	1737
Циклон	0,146 ± 0,058 (0,130)	1,37 ± 0,38 (1,45)	0,058 ± 0,029 (0,045)	0,097 ± 0,044 (0,098)	0,049 ± 0,031 (0,035)	2,099 ± 0,555 (1,75; 2,35)	102	374
Антициклон	0,121 ± 0,059 (0,095)	1,38 ± 0,46 (1,55)	0,047 ± 0,025 (0,035)	0,082 ± 0,047 (0,048)	0,039 ± 0,023 (0,028)	1,575 ± 0,588 (1,60)	163	862
Ложбина	0,155 ± 0,071 (0,110)	1,44 ± 0,33 (1,45)	0,057 ± 0,028 (0,040)	0,109 ± 0,056 (0,075)	0,046 ± 0,026 (0,025)	1,930 ± 0,541 (1,75; 2,35)	146	449
Гребень	0,124 ± 0,062 (0,100)	1,42 ± 0,40 (1,65)	0,047 ± 0,027 (0,035)	0,085 ± 0,048 (0,055)	0,038 ± 0,025 (0,028)	1,570 ± 0,495 (1,60)	178	849
Малогradientное поле	0,151 ± 0,066 (0,108)	1,50 ± 0,36 (1,58)	0,053 ± 0,026 (0,040)	0,107 ± 0,052 (0,070)	0,044 ± 0,023 (0,035)	1,905 ± 0,639 (1,75)	264	1189
Циклон, КАВ	0,116 ± 0,065	1,35 ± 0,46	0,045 ± 0,025	0,081 ± 0,048	0,036 ± 0,021	1,728 ± 0,626	11	20
Циклон, КУВ	0,145 ± 0,079	1,48 ± 0,34	0,053 ± 0,025	0,100 ± 0,045	0,045 ± 0,025	2,326 ± 0,504	45	137
Антициклон, КАВ	0,114 ± 0,055	1,39 ± 0,41	0,046 ± 0,0245	0,078 ± 0,043	0,036 ± 0,022	1,339 ± 0,587	61	288
Антициклон, КУВ	0,117 ± 0,056	1,38 ± 0,45	0,046 ± 0,024	0,079 ± 0,045	0,038 ± 0,020	1,653 ± 0,519	75	388
<i>Зима</i>								
КАВ	0,125 ± 0,065 (0,075; 0,165)	1,10 ± 0,43 (1,0)	0,061 ± 0,037 (0,038)	0,089 ± 0,050 (0,045; 0,105)	0,037 ± 0,024 (0,035)	0,235 ± 0,105 (0,21)	97	332
КУВ	0,118 ± 0,060 (0,075)	1,02 ± 0,36 (0,90)	0,061 ± 0,037 (0,045)	0,076 ± 0,046 (0,07)	0,042 ± 0,027 (0,025)	0,369 ± 0,204 (0,23)	66	242
Циклон	0,171 ± 0,062 (0,125; 0,225)	0,95 ± 0,32 (1,0)	0,090 ± 0,038 (0,09)	0,115 ± 0,055 (0,075)	0,055 ± 0,033 (0,053)	0,427 ± 0,277 (0,30)	13	30
Антициклон	0,110 ± 0,056 (0,088)	1,112 ± 0,420 (0,98)	0,055 ± 0,037 (0,030)	0,073 ± 0,040 (0,068)	0,037 ± 0,028 (0,025)	0,284 ± 0,169 (0,25)	79	281
Ложбина	0,133 ± 0,076 (0,095)	0,963 ± 0,375 (1,05)	0,066 ± 0,034 (0,040)	0,089 ± 0,064 (0,070)	0,046 ± 0,024 (0,033)	0,388 ± 0,202 (0,33)	50	119
Гребень	0,120 ± 0,058 (0,110)	1,054 ± 0,409 (0,88)	0,062 ± 0,038 (0,030)	0,081 ± 0,045 (0,075)	0,040 ± 0,025 (0,025)	0,383 ± 0,201 (0,33)	62	168
Малогradientное поле	0,149 ± 0,066 (0,115; 0,175)	0,971 ± 0,309 (0,80; 1,4)	0,077 ± 0,035 (0,045)	0,096 ± 0,050 (0,088)	0,053 ± 0,030 (0,042)	0,264 ± 0,120 (0,25)	27	80

Таблица 2

Повторяемость различных синоптических объектов в г. Томске в сроки измерений АОТ в период 1968–1975 гг. [21] и в период 2000–2008 гг. (БД ИОА СО РАН)

Синоптический объект	Повторяемость, %					
	В сроки измерения АОТ	Лето		В сроки измерения АОТ	Зима	
		1968–1975	2000–2008		1968–1975	2000–2008
Циклон	8,6	8,6	13,4	3,9	19,2	14,2
Антициклон	19,9	7,5	16,1	36,1	15	24,6
Ложбина	10,3	15,1	22,1	15,3	17,8	34,9
Гребень	19,6	18,3	17,6	21,6	32,9	17,9
Малогradientное поле	27,4	50,5	30,7	10,3	15	8,4
КАВ	26,4	21	42,1	41,3	6	40,7
КУВ	38,7	59	43,3	30,1	62	41,7

Всего было выделено 11 таких ситуаций (пар τ_λ^a «до» и «после дождя»), в которых практически исключалось искажающее влияние других факторов, кроме осадков.

2. Изменение АОТ при смене воздушных масс и барических образований

Относительную величину межсуточных вариаций замутнения атмосферы (в сравнении с другими колебаниями) можно оценить по соотношению дисперсий характеристик, усредненных по различным временным интервалам, к величине дисперсии среднечасовых значений (рис. 1).

Видно, что основной перепад значений σ^2/σ_4^2 для характеристик АОТ наблюдается при изменении интервала усреднения от суток до декады и сезона. Суточные и сезонные колебания вносят существенно меньший вклад. Другое соотношение типов изменчивости у влагосодержания атмосферы – основной вклад в дисперсию вносят сезонные колебания.

Средние спектральные зависимости АОТ атмосферы для различных синоптических объектов в летних и зимних условиях представлены на рис. 2, статистические характеристики – в табл. 1.

Рассмотрим влияние двух типов воздушных масс. Из рис. 2, а видно, что в летний период более теплому и влажному умеренному воздуху ($\bar{T} = 22,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $\bar{W} = 1,88 \text{ г/см}^2$), в сравнении с арктическим ($\bar{T} = 17,4 \text{ }^\circ\text{C}$; $\bar{W} = 1,48 \text{ г/см}^2$), соответствуют и более сильные замутнения атмосферы во

всем диапазоне спектра. Причем величина различий уменьшается с ростом длины волны ($\Delta\tau_{0,34}^a$ от 0,05 до 0,01–0,015 в ИК-диапазоне спектра), что свидетельствует о большем содержании в КУВ как субмикронного, так и грубодисперсного аэрозоля.

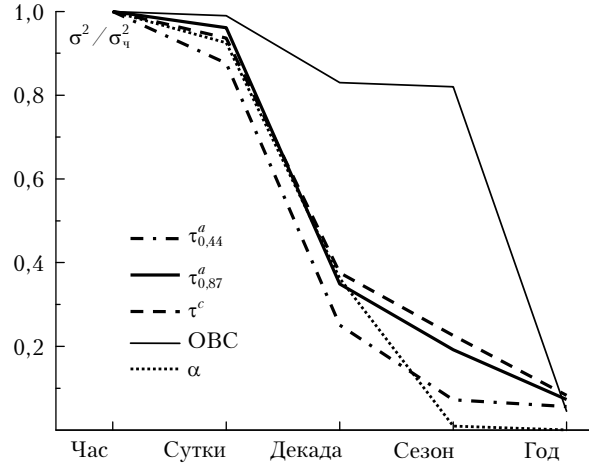


Рис. 1. Соотношение дисперсий АОТ, показателя α и влагосодержания, усредненных по различным временным интервалам, к величине дисперсии среднечасовых значений

В зимний период спектральные различия АОТ атмосферы в КУВ ($\bar{T} = -6,2 \text{ }^\circ\text{C}$; $\bar{W} = 0,37 \text{ г/см}^2$) и КАВ ($\bar{T} = -15,7 \text{ }^\circ\text{C}$; $\bar{W} = 0,24 \text{ г/см}^2$) наблюдаются в основном в ИК-диапазоне спектра. То есть трансформация $\tau^a(\lambda)$ при переходе от КАВ к КУВ обусловлена увеличением в атмосфере грубодисперсного

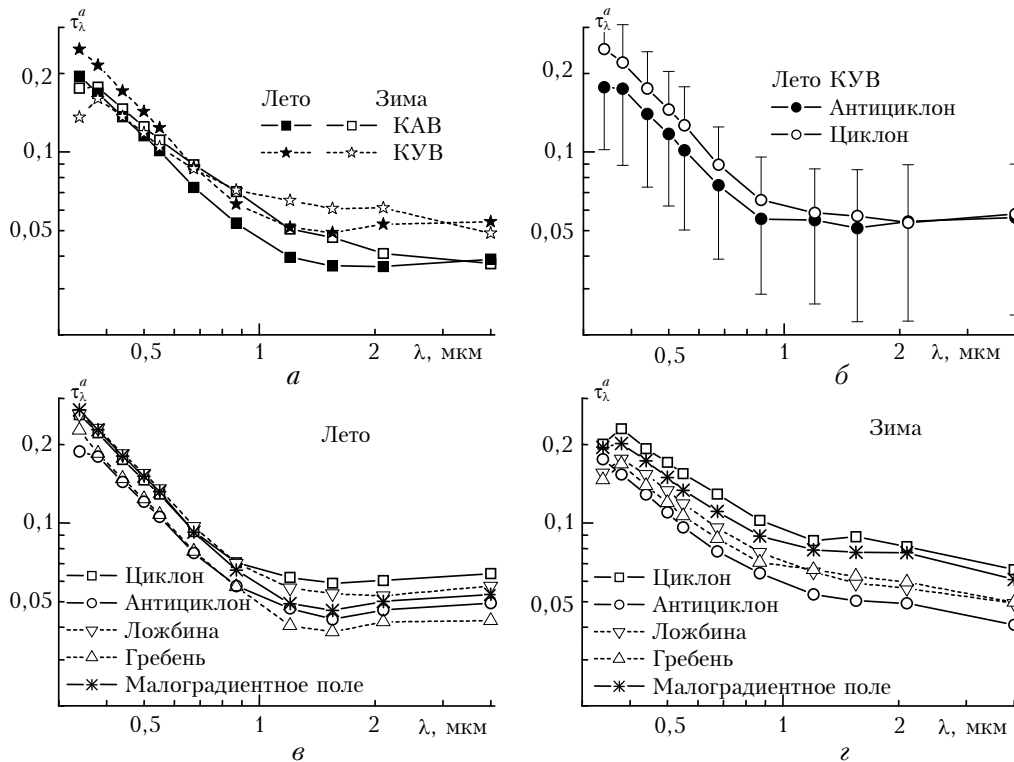


Рис. 2. Средние спектральные зависимости АОТ атмосферы в различных синоптических объектах

аэрозоля. Отметим, что все выборки на рис. 2, *a* статистически различимы по уровню 0,05 хотя бы по одной из характеристик АОТ ($\tau_{0,5}^a$, α или τ^c).

Поскольку на АОТ атмосферы оказывает влияние не только тип воздушной массы, как было показано выше, но и вид барического образования [8], были рассмотрены две выборки, относящиеся к летнему периоду для КУВ в комбинации с двумя наиболее отличающимися барическими полями — циклонами и антициклонами. Сопоставление средних зависимостей $\tau^a(\lambda)$ на рис. 2, *b* показывает, что в циклонах замутнение атмосферы выше, а наибольшие различия наблюдаются в коротковолновой части спектра, т.е. связаны с большим содержанием мелкодисперсных частиц в циклонах. Об этом свидетельствует параметр Ангстрема разностного спектра АОТ для этих выборок $\alpha = 1,9$.

Подобный результат может показаться достаточно неожиданным. Известно, что в циклонах, в которых обычно наблюдается дождливая погода, должны происходить вымывание аэрозоля из атмосферы и, соответственно, уменьшение АОТ. Напротив, в антициклонах, для которых характерны образование инверсионных слоев и накопление аэрозоля в атмосфере, должно наблюдаться увеличение замутнения. Объяснение, по-видимому, заключается в следующем. В циклонах в периоды сплошной облачности и обложных дождей измерения АОТ не проводятся. В условиях же переменной облачности и эпизодических кратковременных осадков, когда возможно проведение измерений, эффект вымывания аэрозоля не столь значителен (см. разд. 3). В то же время в циклонах наблюдаются более высокие значения относительной влажности воздуха *RH*. Например, в период наших измерений средние

значения *RH* составили для циклонов 61,7%, а для антициклонов — 49,5%. Таким образом, превышение аэрозольного ослабления в коротковолновой части спектра для циклонов в сравнении с антициклонами может быть обусловлено влиянием относительной влажности.

Анализ характеристик АОТ атмосферы для различных барических образований показал следующее. Как в летний (рис. 2, *e*), так и в зимний период (рис. 2, *z*) замутнение атмосферы в областях повышенного давления (антициклон, гребень) меньше, чем в областях с пониженным давлением (циклон, ложбина). Причем в летних данных зависимости $\tau^a(\lambda)$ для отмеченных «пар» барических полей практически совпадают в коротковолновом участке спектра, а различия τ_λ^a между «парами» составляют 20–30%. Характеристики АОТ для малоградиентного поля достаточно близки к данным, полученным для циклона и ложбины. Например, в летний период значения τ_λ^a в видимом участке спектра практически совпадают.

Следует отметить, что полученные характеристики АОТ атмосферы для выборок, выделенных по типу барического поля, по-видимому, зависят как от повторяемости разных типов воздушных масс в каждой из выборок, так и от положения самого барического поля по отношению к пункту наблюдения (центр или периферийная часть). Задача разделения влияния барических полей и воздушных масс на τ_λ^a в настоящей статье не ставилась и является предметом дальнейших исследований.

Для выяснения характера изменчивости $\tau_{0,5}^a$ и α атмосферы в различных частях циклонов и антициклонов были построены соответствующие распределения этих характеристик в летний период (рис. 3).

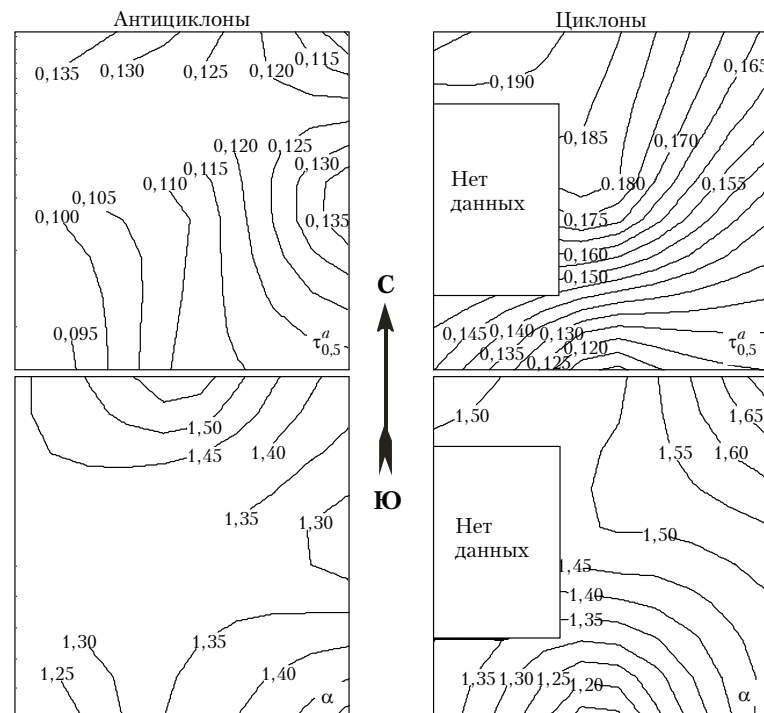


Рис. 3. Распределение $\tau_{0,5}^a$ и α в циклонах и антициклонах в летний период

При анализе была использована дополнительная информация о синоптических объектах (центр, северная часть, северо-восточная часть, восточная, юго-восточная и т.д.), содержащаяся в базе данных ИОА СО РАН.

Видно, что в антициклонах зоны повышенных и пониженных значений $\tau_{0,5}^a$ располагаются на периферийных частях. Повышенные значения ($\tau_{0,5}^a \geq 0,135$) расположены в северо-западной и восточной частях образований, а пониженные ($\tau_{0,5}^a \leq 0,095$) — в юго-западной части. Недостаточное количество измерений, выполненных в западной части циклонов, не позволило построить распределения в полном объеме, тем не менее из полученных данных видно, что $\tau_{0,5}^a$ имеет достаточно выраженный горизонтальный градиент от минимальных значений в южной части ($\tau_{0,5}^a \leq 0,12$) до максимальных ($\tau_{0,5}^a \leq 0,185$) в северной и северо-западной. Заметим, что сходный характер распределения прозрачности атмосферы в циклонах и антициклонах был получен авторами [8] для Омска.

Особенности распределения показателя α в целом совпадают с распределением $\tau_{0,5}^a$. В антициклонах максимальные и минимальные значения α расположены на периферии: $\alpha \geq 1,45$ в северной и юго-восточной частях, $\alpha \leq 1,30$ в юго-западной и восточной частях. В циклонах наиболее значительное изменение параметра Ангстрема происходит в направлении от южной границы ($\alpha \leq 1,2$) до северо-восточной части ($\alpha \geq 1,6$). Причем как в циклонах, так и в антициклонах минимальным значениям $\tau_{0,5}^a$ соответствуют и минимальные α .

3. Влияние на АОТ облачности и выпадения осадков

С синоптическими условиями непосредственно связано состояние облачности. Сравнение средних зависимостей $\tau^a(\lambda)$ для выборок по разным баллам облачности БО (рис. 4, а) показало их статистически значимые различия по уровню 0,05. Основная физическая причина отличия аэрозольных замутнений связана с тем, что малооблачные ситуации, как правило, наблюдаются в барических образованиях повышенного давления, где преобладают нисходящие движения воздуха (антициклон, гребень), а пасмурная погода, наоборот, — в циклонах и ложбинах. Например, если рассмотреть разности τ_λ^a для выборок «сплошная облачность» — «малооблачно» и «циклон» — «антициклон», то полученные спектральные зависимости $\tau^a(\lambda)$ (см. рис. 4, а) достаточно близки друг к другу. Причем основные различия τ_λ^a для этих двух пар выборок наблюдаются в коротковолновой части спектра (параметры Ангстрема составляют 0,99 и 1,33 соответственно) и обусловлены субмикронной фракцией аэрозоля в атмосфере.

Из сравнения средних данных «до» и «после дождя» (рис. 4, б) видно, что после выпадения осадков происходит небольшое уменьшение АОТ,

практически одинаковое во всем спектральном интервале (разностный спектральный ход имеет квазиинтегральную зависимость от длины волны).

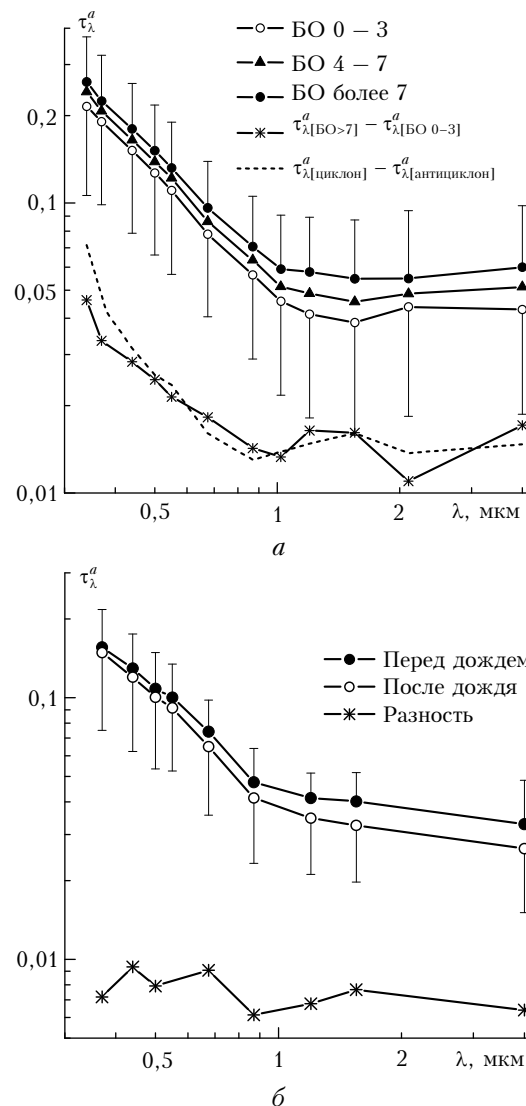


Рис. 4. Спектральные зависимости АОТ в различных условиях: при разных баллах облачности (а), до и после выпадения осадков (б)

Это свидетельствует о вымывании преимущественно грубодисперсного аэрозоля. Однако отмеченные средние различия статистически незначимы (из-за вариаций уровня замутнения в каждой выделенной «паре») и не превышают погрешность измерения АОТ. В то же время если рассмотреть относительные изменения $\tau_{0,5}^a$ после выпадения осадков, то рост замутнения отмечался лишь в двух случаях в среднем на 17% ($\Delta\tau_{0,5}^a = 0,02$). В остальных 9 случаях наблюдалось уменьшение в среднем на 14% ($\Delta\tau_{0,5}^a = 0,015$).

Слабое действие эффекта вымывания, по-видимому, обусловлено вышеуказанным подходом отбора данных, который позволяет оценить влияние только относительно кратковременных дождей.

4. Вейвлет-анализ межсуточной изменчивости АОТ атмосферы

Для выявления периодичностей колебаний АОТ внутрисезонных масштабов в районе г. Томска проанализированы амплитудные вейвлет-спектры $\tau_{0,5}^a$ (отдельно грубодисперсная τ^c и мелкодисперсная $\tau_{0,5}^f$ компоненты), а также ОВС атмосферы. Для вейвлет-анализа выбрана материнская функция Морле, которая обеспечивает хорошее разрешение как во временной, так и в частотной областях и обычно применяется для выделения периодических компонент во временных рядах [23]. Для обеспечения непрерывности рядов при проведении вейвлет-анализа пропуски в измерениях были заполнены значениями, полученными путем линейной интерполяции граничных величин АОТ. Уменьшение влияния конечности рядов достигалось за счет дополнения рядов на границах средним по рядам значением АОТ. В [24] показано, что такая методика исследования планетарных волн по наблюдениям АОТ учитывает неравномерность данных без появления ложных пиков в спектрах и дает возможность исследования пространственно-временной структуры вариаций АОТ, которая зависит от волновых атмосферных процессов внутрисезонного масштаба.

В полученных вейвлет-спектрах проявляются периодичности разной интенсивности в диапазоне временных масштабов от 3 до 60 сут со следующими особенностями. Как правило, значимые пики в амплитудных спектрах τ^c , $\tau_{0,5}^f$ и ОВС наблюдаются синхронно. То есть атмосферные квазипериодические процессы практически одновременно меняют содержание как аэрозоля, так и водяного пара. Наиболее часто наблюдаются вариации с периодами от 3 до 10 сут, которые характерны для волн Россби [25]. Однако более мощными, хотя и более редкими, являются вариации с периодами от 15 до 45 сут.

Проведенный корреляционный анализ амплитуд вейвлет-представлений для значимых периодичностей показал, что коэффициент корреляции рядов амплитуд вариаций τ^c и $\tau_{0,5}^f$ для наиболее значимых периодичностей составляет 0,7–0,9. Корреляция между амплитудами АОТ и ОВС достигает 0,6–0,72 только для колебаний с периодами менее 15 сут. Видимо, эти вариации когерентны, что свидетельствует о нелинейной, но значимой взаимосвязи внутрисезонных вариаций АОТ и ОВС. Заметим, что речь идет о связи именно вариаций, а не самих величин АОТ и ОВС. Взаимосвязь их внутрисезонных вариаций должна быть, так как и АОТ, и ОВС меняются при смене воздушных масс, которые, в свою очередь, обусловлены атмосферной динамикой.

Для более точной оценки когерентности межсуточных вариаций были рассчитаны фазовые вейвлет-спектры. Анализ показал, что квазипериодические вариации с временными масштабами менее 15 сут когерентны для всех параметров. В вариациях с периодами больше 15 сут наблюдается тенденция к некоторому опережению изменения мелкодисперсной компоненты $\tau_{0,5}^f$ над грубодисперсной.

Проведено усреднение вейвлет-спектров по времени. При сопоставлении усредненных амплитудных вейвлет-спектров разных параметров удобно воспользоваться их относительным представлением, т.е. нормировать спектры на среднюю для каждого из параметров величину. Таким образом, полученные спектры характеризуют средний относительный уровень колебаний. Из рис. 5 видно, что внутрисезонные вариации наиболее сильно проявляются для $\tau_{0,5}^f$ (глубина модуляции около 10%).

Полученные спектры характеризуют средний относительный уровень колебаний. Из рис. 5 видно, что внутрисезонные вариации наиболее сильно проявляются для $\tau_{0,5}^f$ (глубина модуляции около 10%).

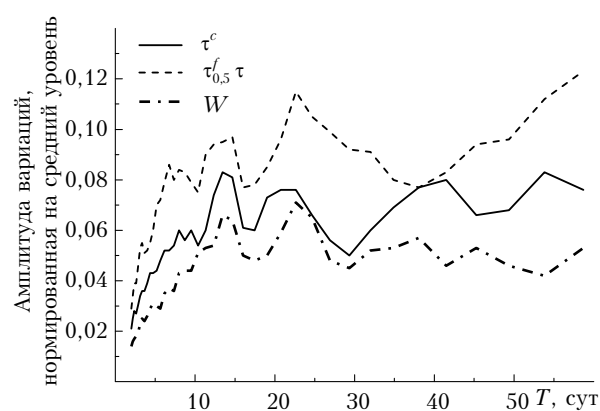


Рис. 5. Вейвлет-спектры грубодисперсной и мелкодисперсной компонент $\tau_{0,5}^a$ и ОВС, нормированные на средний уровень

Относительный уровень колебаний τ^c и ОВС не столь значителен. По-видимому, это обусловлено следующим: 1) изменчивость содержания мелкодисперсных частиц в атмосфере определяется как местными факторами, так и переносом и сменой воздушных масс; 2) содержание грубодисперсного аэрозоля в большей степени зависит от местных источников; 3) слабая изменчивость влагосодержания связана с трансформацией свойств воздушных масс по пути их следования от района формирования.

Отметим, что во всех спектрах на рис. 5 наиболее мощными являются вариации со средними периодами 15 и 24 сут. В спектрах τ^c и $\tau_{0,5}^f$ можно выделить и период в 7 сут. В области длинных периодов (более 30 сут) изменчивость мелкодисперсной компоненты АОТ растет, а изменчивость ОВС, наоборот, падает. Спектр амплитуд τ^c занимает промежуточное положение. Это, по-видимому, также подтверждает различную природу вариаций грубо- и мелкодисперсной фракций аэрозоля с периодами более 25 сут. Возможно, что различие обусловлено не только источниками грубо- и мелкодисперсного аэрозоля, но и вкладом в изменчивость $\tau_{0,5}^f$ аэрозольных частиц на разных высотах атмосферы со своими режимами циркуляции.

5. Географические различия изменчивости АОТ и ОВС атмосферы

Для оценки пространственных особенностей были проанализированы амплитудные вейвлет-спектры $\tau_{0,5}^f$ и ОВС по данным станций Екатеринбург, Томск, Иркутск, Якутск и Уссурийск.

Во всех исходных вейвлет-спектрах проявились периодичности разной интенсивности в диапазоне от 3 до 60 сут. Как правило, периоды значимых пиков в спектрах АОТ и влагосодержания совпадают для каждого из пунктов наблюдений. То есть атмосферные квазипериодические процессы одновременно меняют содержание как аэрозоля, так и водяного пара. Однако соотношения между амплитудами разных периодов в спектрах, рассчитанных для разных пунктов наблюдений, имеют отличия. В большей степени эти различия проявляются для влагосодержания, так как его изменение варьирует не только за счет переноса воздушных масс, но и за счет термодинамических атмосферных процессов. Различие амплитуд вариаций АОТ в каждом пункте обусловлено, видимо, различием источников аэрозоля.

В исходных амплитудных вейвлет-спектрах АОТ и ОВС для каждого пункта мы провели отбор событий превышения вейвлет-спектром уровня значимости в совокупности с узким максимумом фазового спектра. Эти критерии позволяют выделить во временных рядах квазипериодические вариации, связанные с планетарными волнами [24]. Отметим, что найдены 334 случая для $\tau_{0,5}^f$ и 322 случая для ОВС в течение всего исследуемого периода. Для каждого параметра были построены гистограммы периодов вариации, представленные на рис. 6.

Видно, что для всех параметров наиболее часто наблюдаются колебания с периодами от 3 до 8 сут, которые характерны для волн Россби [25]. Сравнительные распределений по критерию Пирсона показали, что эти распределения с 95%-й вероятностью принадлежат к одной генеральной совокупности, т.е. вариации всех исследуемых характеристик определяются одними и теми же синоптическими процессами.

Проведенный корреляционный анализ матриц вейвлет-представлений, полученных в разных пунктах, показал, что коэффициент корреляции значим с вероятностью 80% и меняется в пределах 0,24–0,49 для АОТ и 0,43–0,58 для ОВС атмосферы. Исходные ряды $\tau_{0,5}^f$ не показывают корреляции, в отличие от рядов влагосодержания, где сильные когерентные сезонные вариации обеспечивают корреляцию 0,6–0,85. Это свидетельствует о том, что связь внутрисезонных вариаций АОТ и влагосодержания в различных пунктах нелинейна, но значима. Наиболее сильная корреляция наблюдается для вариаций АОТ и ОВС Иркутска–Томска (0,48–0,49) и Иркутска–Якутска (0,52–0,58), что, видимо, вызвано циркуляцией воздушных масс одного типа.

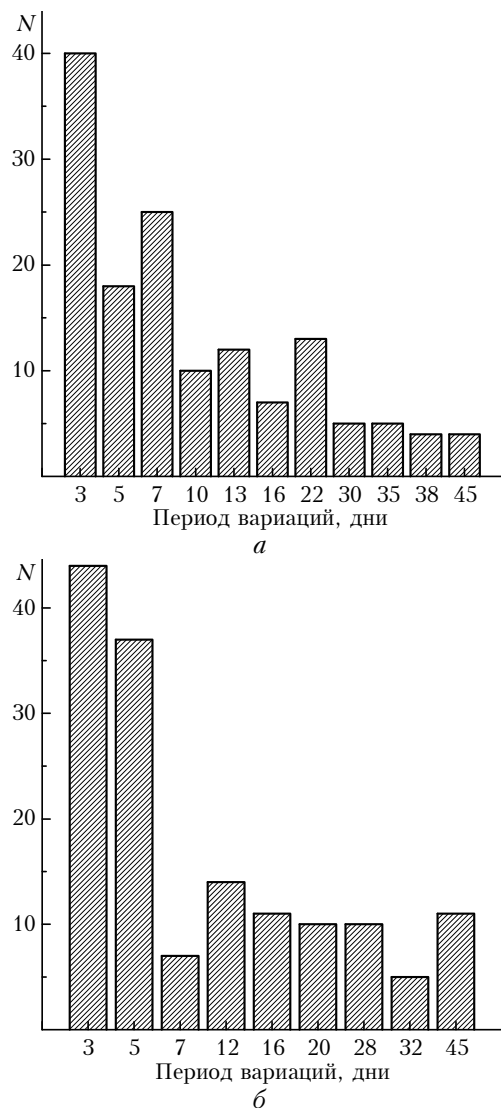


Рис. 6. Гистограмма периодов вариаций $\tau_{0,5}^f$ (а) и ОВС атмосферы (б)

Проведено усреднение вейвлет-спектров по времени для каждого временного масштаба *по отдельности по общему периоду* наблюдений для всех пунктов. В среднем спектре синоптических вариаций проявляются значимые моды 3–4, 7–10, 11–14, 20–25 и 35–50 сут. В то же время в географическом распределении интенсивности внутрисезонных колебаний АОТ над исследуемой территорией существуют как общие черты, так и индивидуальные особенности.

Сходство средних вейвлет-спектров сравнивалось с помощью кластерного анализа. Выбраны метод евклидовых расстояний и алгоритм древовидной кластеризации [26]. Обнаружено, что для $\tau_{0,5}^f$ наиболее сходные средние спектры имеют Екатеринбург и Томск, наиболее сильно от всех отличается Уссурийск. Для ОВС наиболее близкое сходство в средних спектрах показали Екатеринбург и Якутск, к ним близок Томск. Спектры вариаций ОВС в Уссурийске и Иркутске сильно от-

личаются друг от друга и от остальных спектров. Заметим, что в Уссурийске преобладают по интенсивности вариации с периодами от 40 до 55 сут.

Преобладание в Уссурийске вариаций с периодами от 40 до 55 сут характерно и для нормированных спектров (рис. 7). Для других пунктов такой зависимости не отмечается.

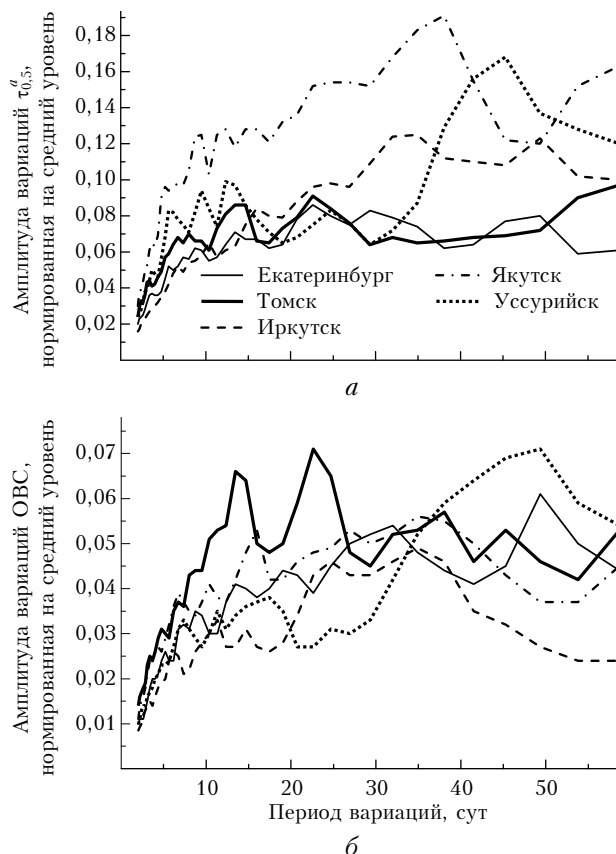


Рис. 7. Вейвлет-спектры $\tau_{0,5}^a$ и OBC, усредненные по времени и нормированные на средний уровень

Проявление сильных вариаций этих масштабов может быть следствием более существенного взаимодействия атмосферы в Дальневосточном регионе, прилегающем к океану, и через него с тропической атмосферой, где эти гармоники обычно связаны с колебаниями Маддена–Джулиана [27, 28].

Для OBC наиболее близкое сходство в нормированных спектрах показали Екатеринбург и Якутск, наиболее сильно отличается Иркутск.

Достаточно близкое сходство в нормированных спектрах вариаций AOT показали Екатеринбург и Томск. Уссурийск, Иркутск и Якутск сильно отличаются друг от друга, а также и от других пунктов. В Якутске наблюдается наиболее сильное проявление внутрисезонных вариаций $\tau_{0,5}^a$ относительно среднего уровня, т.е. внутрисезонная изменчивость здесь больше, чем в других исследуемых пунктах, определяется именно переносом аэрозоля воздушными массами. В других пунктах, видимо, синоптические вариации AOT больше обусловлены модуляцией среднего уровня местного аэрозоля.

Заключение

Анализ статистических характеристик AOT атмосферы в Сибири (Томск) для двух типов воздушных масс и различных барических образований, а также вейвлет-спектров вариаций AOT и OBC в нескольких районах Сибири позволил выявить следующие особенности.

Различия $\tau^a(\lambda)$ в КУВ и КАВ в летний период проявляются во всем диапазоне спектра и определяются большим содержанием в КУВ как субмикронного, так и грубодисперсного аэрозоля. В зимний период спектральные различия между AOT для этих воздушных масс проявляются в основном в ИК-диапазоне. В циклонах замутнение атмосферы в летний период выше, чем в антициклонах. Наибольшие различия AOT наблюдаются в коротковолновой части спектра и связаны с большим содержанием мелкодисперсных частиц в циклонах. В антициклонах зоны повышенных и пониженных значений $\tau_{0,5}^a$ и α расположены на периферийных частях. В циклонах распределение $\tau_{0,5}^a$ имеет достаточно выраженный горизонтальный градиент, а наиболее значительное изменение параметра Ангстрема происходит в направлении от южной границы до северо-восточной периферии.

В спектрах внутрисезонной изменчивости $\tau_{0,5}^a$ и OBC наиболее часто наблюдаются волновые вариации с периодами от 3 до 10 сут, которые характерны для волн Россби. Эти периоды показали когерентность вариаций грубодисперсной и мелкодисперсной компонент AOT, а также OBC. Однако более мощными, хотя и более редкими, являются вариации с периодами от 15 до 45 сут.

Пространственная корреляция внутрисезонных вариаций $\tau_{0,5}^a$ и OBC в различных пунктах значима, но имеет, скорее всего, нелинейный характер. Наиболее тесная корреляционная связь наблюдается между спектрами внутрисезонных вариаций Иркутск–Томск и Иркутск–Якутск, что, видимо, вызвано циркуляцией воздушных масс одного типа. В изменчивости радиационных компонент в Приморье преобладают по интенсивности вариации с периодами от 40 до 55 сут, что, вероятно, обусловлено расположением данного региона на границе «суша–океан» и влиянием тропических воздушных масс.

Авторы выражают признательность Бренту Холбену, Александру Смирнову и другим сотрудникам сети AERONET за возможность использования данных измерений солнечных фотометров на территории Сибири.

Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 75 и государственных контрактов № 02.740.11.0674 и 740.11.0204.

1. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 183 с.
2. Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Вариации аэрозольной оптической толщи атмосферы в районе г. Томска для ряда сезонов 1992–1995 гг. // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9, № 6. С. 727–734.

3. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Еремина Т.А., Рассказчикова Т.М., Турчинович С.А. О маломасштабной пространственно-временной изменчивости прозрачности атмосферы и солнечной радиации // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11, № 10. С. 1049–1054.
4. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. Спектральная зависимость аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 0,34–4 мкм // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 2. С. 156–164.
5. 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., Польшин В.В., Смирнов А., Тащилин 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 атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 566–574.
6. Сакерин С.М., Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М. О дневной изменчивости аэрозольной оптической толщи атмосферы и радиационного форсинга аэрозоля в типичном районе Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 8. С. 700–709.
7. Михалев А.В., Тащилин М.А. Аэрозольная оптическая толща атмосферы и ее вариации в регионе Восточной Сибири (Тункинская долина) в 2004–2008 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 575–578.
8. Белан Б.Д., Задде Г.О., Кусков А.И., Рассказчикова Т.М. Спектральная прозрачность атмосферы в основных синоптических объектах // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 9. С. 1187–1197.
9. Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 224 с.
10. Ponczkowska A., Zielinski T., Petelski T., Markowicz T., Chourdakakis G., Georgoussis G. Aerosol Optical Depth Measured at Different Coastal Boundary Layers and Its Links with Synoptic-Scale Features // Remote Sens. 2009. N 1. P. 557–576.
11. Горбаренко Е.В. Пространственно-временная изменчивость аэрозольной составляющей оптической толщи атмосферы на территории СССР // Метеорол. и гидрол. 1997. № 5. С. 36–44.
12. Smirnov A., Royer A., O'Neill N.T., Tarussov A. A study of the link between synoptic air mass type and atmospheric optical parameters // J. Geophys. Res. D. 1994. V. 99, N 10. P. 20967–20982.
13. Smirnov A., O'Neill N.T., Royer A., Tarussov A., McArthur B. Aerosol optical depth over Canada and the link with synoptic air mass types // J. Geophys. Res. D. 1996. V. 101, N 14. P. 19,299–19,318.
14. Power H.C., Sheridan S.C., Senkbeil J.C. Synoptic Climatological Influences on The Spatial and Temporal Variability of Aerosols over North America. // Int. J. Climatol. 2006. V. 26, N 6. P. 723–741.
15. Shahgedanova M., Lamakin M. Trends in aerosol optical depth in the Russian Arctic and their links with synoptic climatology // Sci. Total Environ. 2005. V. 341, N 1–3. P. 133–148.
16. Панченко М.В., Терпугова С.А. Внутрисезонные факторы изменчивости характеристик субмикронного аэрозоля. 1. Воздушные массы // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 12. С. 1761–1766.
17. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 12. С. 1162–1169.
18. Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Информационная система для сетевых солнечных фотометров // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 61–67.
19. Сакерин С.М., Горбаренко Е.В., Кабанов Д.М. Особенности многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщи атмосферы и оценки влияния различных факторов // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 7. С. 625–631.
20. Прогноз и контроль оптико-метеорологического состояния атмосферы / Под ред. Г.О. Задде. Томск: Изд. ТФ СО АН СССР, 1982. 153 с.
21. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ковалевский В.К., Плотноков А.П., Покровский Е.В., Толмачев Г.Н. Автоматический пост для мониторинга малых газовых составляющих атмосферного воздуха // Метеорол. и гидрол. 1999. № 3. С. 110.
22. Климат Томска / Под ред. С.Д. Кашинского, Л.И. Трифоновой, Ц.А. Швер. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 176 с.
23. Torrence G., Compo G.P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79, N 1. P. 61–78.
24. Хуторова О.Г. Методика исследования влияния планетарных волн на вариации аэрозольной оптической толщины // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 4. С. 392–396.
25. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. Т. 1, 2. М.: Мир, 1986. 397 с; 415 с.
26. Андерсен Т. Введение в многомерный статистический анализ. М.: Физматгиз, 1963. 500 с.
27. Madden R.A., Julian P.R. Observation of the 40–50 day tropical oscillation // Mon. Weather Rev. 1999. V. 122, N 5. P. 814–837.
28. Krishnamurti T.N., Gadgil S. On the structure of the 30 to 50 day mode over the globe during FGGE // Tellus. 1985. V. 37A, N 4. P. 336–360.

D.M. Kabanov, T.R. Kurbangaliev, T.M. Rasskazchikova, S.M. Sakerin, O.G. Khutorova. Influence of synoptic factors on variations of aerosol optical depth of the atmosphere in Siberia.

Relations of the aerosol optical depth of the atmosphere (AOD) with different synoptic factors are analyzed based on the results of many-year measurements in the typical region of Siberia (Tomsk). The mean spectral dependences of AOD in two types of air mass (continental mid-latitude and arctic air) and different baric formations are compared. The effect of cloud fraction and precipitation on AOD is estimated. The results of wavelet analysis of the AOD and columnar water vapor series in some observation sites (AERONET stations Tomsk, Yekaterinburg, Irkutsk, Yakutsk and Ussurijsk) are discussed. The peculiarities of synoptic quasi-periodic variations in different measurement sites are revealed and compared.