

Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири

С.М. Сакерин¹, С.А. Береснев², С.Ю. Горда², Д.М. Кабанов¹,
Г.И. Корниенко³, Ю.И. Маркелов⁴, А.В. Михалев⁵, С.В. Николашкин⁶,
М.В. Панченко¹, В.А. Поддубный⁴, В.В. Полькин¹, А. Смирнов⁷,
М.А. Тащилин⁵, С.А. Турчинович¹, Ю.С. Турчинович¹,
Б. Холбен⁷, Т.А. Еремина^{1*}

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

²Уральский государственный университет
620083, г. Екатеринбург, К-83, пр. Ленина, 51

³Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН
692533, с. Горнотаежное, Уссурийский район, Приморский край

⁴Институт промышленной экологии УрО РАН
620219, г. Екатеринбург, ГСП-594, ул. С. Ковалевской, 20а

⁵Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, а/я 291, ул. Лермонтова, 126

⁶Институт космических исследований и аэронавтики СО РАН
677891, г. Якутск, ул. Ленина, 31

⁷Центр космических полетов Годдарда (GSFC/NASA)
г. Гринбелт, MD 20771, США

Поступила в редакцию 17.12.2008 г.

На основе многолетних наблюдений в Томске (с 1995 г., в диапазоне спектра 0,37–4 мкм) и других районах азиатской части России (2003–2008 гг.) определены особенности годового хода характеристик спектральной аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы. Показано, что максимумы АОТ наблюдаются в апреле (0,19 в области 0,5 мкм) и июле, локальный минимум в июне (менее 0,16) и минимальные значения осенью (0,12). Сезонная изменчивость показателя селективности Ангстрема характеризуется повышенными значениями в теплый период (максимум в июле) и низкими – зимой. Отмечается близость сезонной изменчивости аэрозольного замутнения в трех районах Сибири, и предлагается средний для Сибири годовой ход характеристик АОТ атмосферы. Приводятся средние величины оптических и микрофизических характеристик аэрозоля атмосферной толщи для характерных периодов внутригодовой изменчивости АОТ.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, влагосодержание, годовой ход.

Введение

Последнее 20-летие характеризуется детализацией исследований атмосферного аэрозоля как радиа-

ционного фактора климата в части: уточнения закономерностей его изменчивости в основных масштабах колебаний, определения региональных особенностей, поглощательных свойств аэрозоля и т.д. Одним из эффективных средств получения данных о радиационных характеристиках аэрозоля остаются методы солнечной фотометрии атмосферы, основанные на измерении спектрально-угловых характеристик приходящего (прямого и рассеянного) солнечного излучения. Наиболее распространенным источником информации по характеристикам аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы является глобальная сеть AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>), в которой используются Sun-Sky-фотометры Cimel CE 318 (www.cimel.fr).

Важную роль в изменчивости состава аэрозоля и АОТ атмосферы τ_a^a играют годовые колебания, обусловленные астрономическим фактором – изменением склонения Солнца и прихода солнечной

* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Сергей Анатольевич Береснев (sergey.beresnev@usu.ru); Станислав Юрьевич Горда (stanislav.Gorda@usu.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Геннадий Иванович Корниенко (kornienko@utl.ru); Юрий Иванович Маркелов (markelov@esko.uran.ru); Александр Васильевич Михалев (mikhalev@iszf.irk.ru); Семен Викторович Николашкин (nikolashkin@ikfia.ysn.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Василий Алексеевич Поддубный (Basil@esko.uran.ru); Виктор Викторович Полькин (victor@iao.ru); Александр Смирнов (Alexander.Smirnov-1@nasa.gov); Михаил Анатольевич Тащилин (miketash@iszf.irk.ru); Сергей Антонович Турчинович; Юрий Сергеевич Турчинович (tus@iao.ru); Brent Холбен (Brent.N.Holben@nasa.gov); Татьяна Анатольевна Еремина.

радиации. Особенности годового хода τ_λ^a формируются под влиянием не только изменения инсоляции и метеопараметров в приземном слое, но, пожалуй, в большей степени из-за смены состояния подстилающей поверхности (как источника генерации аэрозоля) и атмосферных циркуляций. Поэтому в разных климатических зонах характер сезонных изменений аэрозольного замутнения имеет свои особенности.

Сезонные вариации характеристик аэрозольной мутности атмосферы на территории России анализировались разными авторами [1–3 и др.]. Региональные особенности годового хода АОТ, восстановленные для длины волны 0,55 мкм по результатам актинометрических наблюдений, наиболее подробно рассматривались в серии работ [4–6 и др.].

Закономерности изменчивости *спектральных* АОТ обсуждались в наших публикациях [7, 8] по данным многоволновых измерений прозрачности атмосферы в районе Томска. Для четырех основных сезонов были определены спектральные зависимости $\tau^a(\lambda)$ в диапазоне спектра 0,37–4 мкм, мелко- и грубодисперсная компоненты АОТ, а также параметры α , β формулы Ангстрема, которая широко используется при описании спектрального хода АОТ в коротковолновом диапазоне (~0,34÷1 мкм):

$$\tau^a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha},$$

где α – показатель селективности Ангстрема; β – коэффициент мутности.

Сравнение характеристик АОТ для разных периодов показало, что более контрастно различаются переходные сезоны: максимальное замутнение наблюдается весной, а минимальное осенью. Летний и зимний спектры АОТ занимают промежуточное положение, отличаясь друг от друга разной селективностью спектрального хода $\tau^a(\lambda)$ или показателем α .

В анализе, проведенном в [7, 8], использовались среднесезонные спектральные зависимости $\tau^a(\lambda)$ за период наблюдений до 2005 г. При трехмесячном усреднении отдельные особенности внутригодовой изменчивости АОТ могут не проявиться. Поэтому в настоящей статье рассмотрен более детальный годовой ход, рассчитанный по среднемесячным зна-

чениям АОТ с привлечением новых результатов наблюдений (до октября 2008 г.). Кроме томских данных, обсуждаются также особенности изменчивости аэрозольного замутнения в других районах азиатской части России и предлагается средний для Сибири годовой ход характеристик АОТ.

1. Объем полученных данных

На территории Сибири наиболее длительные (с 1992 г.) исследования спектральных АОТ атмосферы ведутся в Томске с использованием фотометров типа SP [9, 10]. Начиная с 2000 г. измерения стали проводиться круглогодично и в более широком диапазоне спектра 0,34–4 мкм. Анализ межгодовой изменчивости АОТ атмосферы [11] показал, что для выявления закономерностей годового хода следует использовать результаты измерений с 1995 г., когда атмосфера вернулась к «фоновому» состоянию после извержения влк. Пинатубо. До октября 2008 г. общее число дней измерений составило 1406.

Для развития аэрозольного мониторинга дополнительно были организованы наблюдения фотометрами CE 318 (AERONET) – сначала в Томске, а затем в других районах азиатской части России [12] (табл. 1).

Напомним, что по результатам измерений фотометрами CE 318 определяют две группы характеристик [13–15]: 1) спектральные АОТ и влагосодержание атмосферы; 2) параметры микроструктуры, показатель преломления, индикатрису и альbedo однократного рассеяния (АОР) аэрозоля. Объем данных, полученных по разным характеристикам, не одинаков: АОТ и влагосодержание измеряются во всех случаях, когда Солнце не закрыто облаками; вторая группа характеристик определяется только для ситуаций безоблачного неба, и процедура их окончательного расчета более продолжительная.

До анализа изменчивости характеристик АОТ важно было оценить статистическую обеспеченность AERONET наблюдений. С этой целью была проведена систематизация данных, полученных в разных районах и по разным характеристикам аэрозоля.

Т а б л и ц а 1

Статистика полученных данных (дней измерений) в разных районах AERONET наблюдений

Пункт наблюдений	Координаты	Ближайший город	N	$N_{1,5}$	N^* (без 2008 г.)	N_{SSA}	N_{VD}
Томск	56° 29' с. ш., 85° 03' в. д.	Томск	1575	933	1395	32	239
Торы	51°55' с.ш., 103° в.д.	Иркутск	791	404	645	3	44
Коуровка	57° 02' с.ш., 59° 33' в.д.	Екатеринбург	829	451	694	7	28
Октем	61°40' с. ш., 129° 22' в. д.	Якутск	995	569	820	7	154
Горнотаежное	43° 42' с. ш., 132° 10' в. д.	Уссурйск	965	485	820	11	77
Шихово	55° 42' с. ш., 36° 46' в. д.	Звенигород	563	307	420	11	69

В расчетах учитывалась следующая исходная информация: N – общая продолжительность (дней), когда приборы находились в режиме измерений (до 1 октября 2008 г. включительно); $N_{1,5}$ – количество дней состоявшихся измерений АОТ и влагосодержания по уровню 1,5; N^* – общий период наблюдений до конца 2007 г.; N_{VD} – количество дней измерений, в которые были восстановлены параметры микроструктуры; N_{SSA} – количество дней определения показателя преломления и АОР аэрозоля.

Из табл. 1 видно, что в Томске значения АОТ (по уровню 1,5) определены за 933 дня, а в других районах в 1,5–2 раза меньше. Несмотря на имеющиеся отличия, количество данных по АОТ и влагосодержанию атмосферы в Сибири (более 400 дней) можно считать достаточным для оценки особенностей замутнения атмосферы в отдельных регионах. Хуже обстоит дело с другими характеристиками – даже в Томске, параметры микроструктуры и АОР аэрозоля восстановлены только за 239 и 32 дня. Основная причина малочисленности этих данных – малое количество безоблачных ситуаций в умеренных широтах Евразии.

2. Годовой ход АОТ в районе Томска

Для определения среднего годового хода АОТ атмосферы в Томске за основу был взят более многолетний (1995–2008 гг.) ряд наблюдений фотометров типа SP в диапазоне спектра 0,37–4 мкм. Для периодов, когда отсутствовали измерения SP (ремонт и др.) привлекались данные наблюдений фотометра CE 318 в более узком диапазоне спектра 0,34–1,02 мкм. Результаты автоматизированных измерений солнечных фотометров (SP и CE 318) подвергались фильтрации (очистке) от влияния облаков. Кроме стандартной процедуры фильтрации («cloud screening»), применяемой к данным фотометров CE 318 [16], проводилась дополнительная отбраковка тех спектров АОТ, в которых одновременно выполнялось условие $\alpha < 1$ и $\tau_{0,87}^a > 0,2$ (подробнее см. [12, 17]). Процедура получения средних значений АОТ для каждого месяца заключалась в последовательном расчете сначала среднечасовых, по ним среднесуточных и затем среднемесячных значений. Полученный годовой ход спектральных АОТ атмосферы приведен на рис. 1, а.

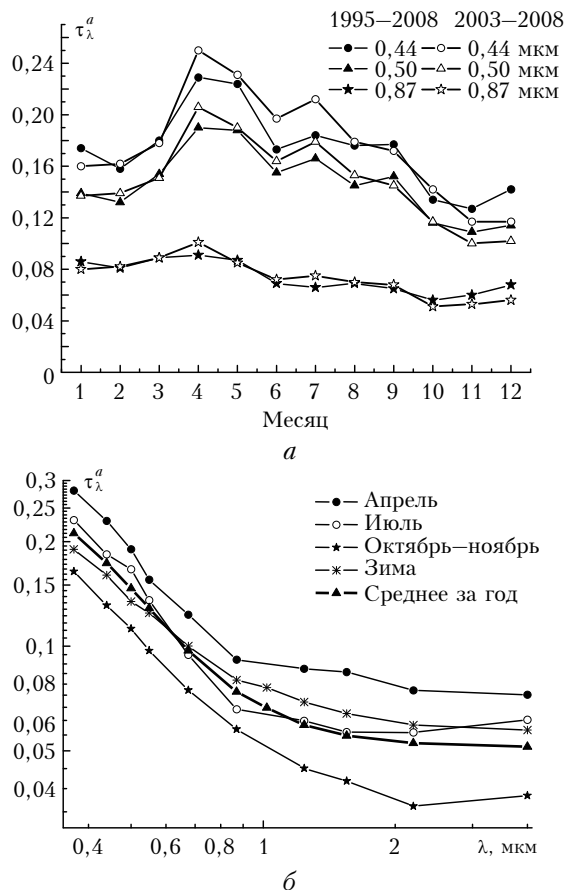


Рис. 1. Годовой ход АОТ атмосферы в Томске по многолетним наблюдениям (1995–2008 гг.) в сопоставлении с данными для более короткого периода (2003–2008 гг.) (а) и средние спектры $\tau^a(\lambda)$ в характерные месяцы года (б)

Во внутригодовой изменчивости хорошо видно наличие основного максимума аэрозольного замутнения в апреле, локального минимума в июне, второго максимума в июле и минимума в октябре–ноябре. Относительное изменение τ_λ^a от апреля к ноябрю, например в области 0,44 мкм, составляет более 50%. В табл. 2 и на рис. 1, б приведены более подробные данные об АОТ в области спектра 0,37–4 мкм и влагосодержании атмосферы W для характерных периодов (месяцев максимумов/минимумов значений АОТ). Анализ данных показал следующее.

Таблица 2

Средние значения (\pm СКО) τ_λ^a , параметров α , β и влагосодержания W ($\text{г}/\text{см}^2$) в характерные периоды года

Период	Характеристика								
	$\tau_{0,37}^a$	$\tau_{0,5}^a$	$\tau_{0,87}^a$	$\tau_{1,24}^a$	$\tau_{2,14}^a$	τ_4^a	α	β	W
Апрель	0,28±0,08	0,19±0,05	0,091±0,026	0,086±0,046	0,075±0,043	0,072±0,046	1,34±0,20	0,075±0,023	0,69±0,35
Июль	0,23±0,06	0,17±0,04	0,066±0,016	0,061±0,012	0,056±0,016	0,061±0,018	1,51±0,22	0,053±0,013	2,20±0,19
Октябрь–ноябрь	0,16±0,05	0,11±0,03	0,058±0,019	0,045±0,016	0,035±0,015	0,037±0,018	1,25±0,33	0,048±0,018	0,63±0,21
Зима	0,19±0,06	0,13±0,04	0,080±0,029	0,069±0,031	0,059±0,032	0,057±0,032	1,04±0,25	0,068±0,026	0,26±0,08
Год	0,21±0,04	0,15±0,03	0,074±0,012	0,059±0,015	0,053±0,014	0,051±0,013	1,26±0,20	0,061±0,010	0,95±0,69

1. Спектральные зависимости $\tau^a(\lambda)$ в характерные месяцы года (рис. 1, б) хорошо согласуются с ранее выявленными особенностями АОТ в отдельные сезоны (см. [7]). В частности, максимальные и минимальные значения АОТ во всем диапазоне спектра наблюдаются весной и осенью соответственно. Летние и зимние спектры $\tau^a(\lambda)$ занимают промежуточное положение (при разной селективности) и близки к среднегодовым значениям.

2. По абсолютной величине годовой ход τ_λ^a в ИК-диапазоне менее выражен (максимум в апреле, минимум в октябре) и летний максимум значимо не проявляется (см. рис. 1, а). Общая амплитуда годовой изменчивости АОТ в УФ-диапазоне превышает 0,1, а в ИК-диапазоне в 3 раза меньше.

3. Локальный минимум АОТ, наблюдаемый в июне ($\tau_{0,5}^a$ менее 0,16), по-видимому, является следствием наложения на годовой ход дополнительного более сильного весеннего всплеска аэрозольного замутнения.

4. У показателя селективности Ангстрема повышенные значения ($\alpha > 1,3$) наблюдаются в теплый период (с апреля по октябрь) и низкие ($\alpha < 1,2$) в холодный. Параметр мутности Ангстрема β (примерно равный грубодисперсной компоненте АОТ [8]) имеет минимальные значения осенью, а максимальные — в апреле.

Приведенные особенности сезонной изменчивости АОТ являются типичными (но не повсеместными) для многих континентальных районов умеренных широт. В качестве примера можно привести данные в пунктах наблюдений Краснодар, Нижнедевицк, Мангун, Цимлянск и др. в России [4, 6]; Lindenberg в Германии [18]; CART Site/Oklahoma и Bondville/Illinois в США [19]; Sherbrooke в Канаде [20] и т.д. По среднегодовым значениям характеристик АОТ атмосферы (см. нижнюю строку в табл. 2) Томск можно отнести к фоновым районам бореальной зоны Евразии.

Ряды наблюдений АОТ атмосферы в других районах Сибири менее продолжительные — с 2003 г. Поэтому, на примере Томска, было важно проверить, насколько правильно данные наблюдений для короткого периода отражают особенности годового хода АОТ атмосферы. Из сравнения результатов на рис. 1, а следует, что основные закономерности внутригодовой изменчивости одинаково проявились на длинном (1995–2008 гг.) и коротком (2003–2008 гг.) рядах наблюдений. Среднемесячные значения τ_λ^a для двух разных периодов тоже достаточно близки (некоторое отличие просматривается только в области 0,44 мкм для 4, 6, 7 мес). Таким образом, относительно короткий период наблюдений (5–6 лет) в данном случае можно использовать для оценки особенностей сезонной изменчивости АОТ в разных районах азиатской части России.

3. Особенности годового хода АОТ в других районах Сибири

На рис. 2 показан средний годовой ход исследуемых характеристик атмосферной толщи для пяти районов AERONET наблюдений.

Для более полного представления особенностей сезонной изменчивости дополнительно был рассчитан относительный годовой ход — среднемесячные значения характеристик, нормированных на среднегодовые значения. Из рис. 2, а видно, что внутригодовая изменчивость АОТ атмосферы в районах Томска, Якутска и п. Торы (юго-западнее Байкала) имеет близкий характер с повышенными значениями в апреле–мае и июле, минимумом осенью и локальным минимумом в июне.

Для АОТ атмосферы в Приморье характерны более высокие значения круглый год (в 1,5–2 раза выше, чем в других районах), но хорошо проявилась основная закономерность — весенний и летний максимумы. Есть некоторые отличия от Сибири в годовом ходе аэрозольного замутнения в районе Екатеринбурга: например, практически отсутствуют весенний максимум и июньский минимум, а основной максимум АОТ наблюдается в июле.

Сезонное изменение показателя селективности Ангстрема (рис. 2, б) характеризуется увеличением значений α при переходе от холодного периода (октябрь–март) к теплomu. Отступление от этой закономерности наблюдается в двух районах: в п. Кюровка (Екатеринбург) — очень высокие значения показателя α в феврале–апреле (возможно из-за более ранней весны или малочисленности полученных данных); в п. Торы — пониженные значения α в августе–ноябре.

Среди рассматриваемых характеристик атмосферной толщи наиболее хорошо выражен и одинаков во всех районах годовой ход влагосодержания атмосферы (рис. 2, в). Максимум влагосодержания наблюдается в июле ($W > 2$ г/см²), а минимум зимой ($W < 0,3$ г/см²). Более высокие значения влагосодержания в Уссурийске в летний период являются известным следствием зональной зависимости влажности и влияния океана.

Близость внутригодовой изменчивости АОТ и показателя Ангстрема в районах Сибири дала основание рассчитать средний годовой ход этих характеристик (рис. 3).

Средний для Сибири годовой ход τ_λ^a имеет те же особенности, которые уже отмечались. В частности, максимумы замутнения наблюдаются в апреле–мае ($\tau_{0,5}^a > 0,18$) и июле ($\tau_{0,5}^a \sim 0,17$), есть локальный минимум в июне ($\tau_{0,5}^a \sim 0,15$) и минимальные значения в ноябре ($\tau_{0,5}^a \sim 0,1$). Средний для Сибири годовой ход показателя Ангстрема характеризуется максимумом в июле ($\alpha > 1,4$) и минимумом в январе–феврале ($\alpha \approx 1$).

Из рис. 3, б видно качественное сходство годового хода τ_λ^a , показателя α и влагосодержания атмосферы — низкие значения в холодный период и повышенные в теплый (общий максимум наблюдается в июле). Относительные годовые амплитуды τ_λ^a и показателя Ангстрема имеют близкие значения — от 20 до 30%. Более выражено годовое колебание влагосодержания, которое изменяется в 2–4 раза относительно среднегодового значения.

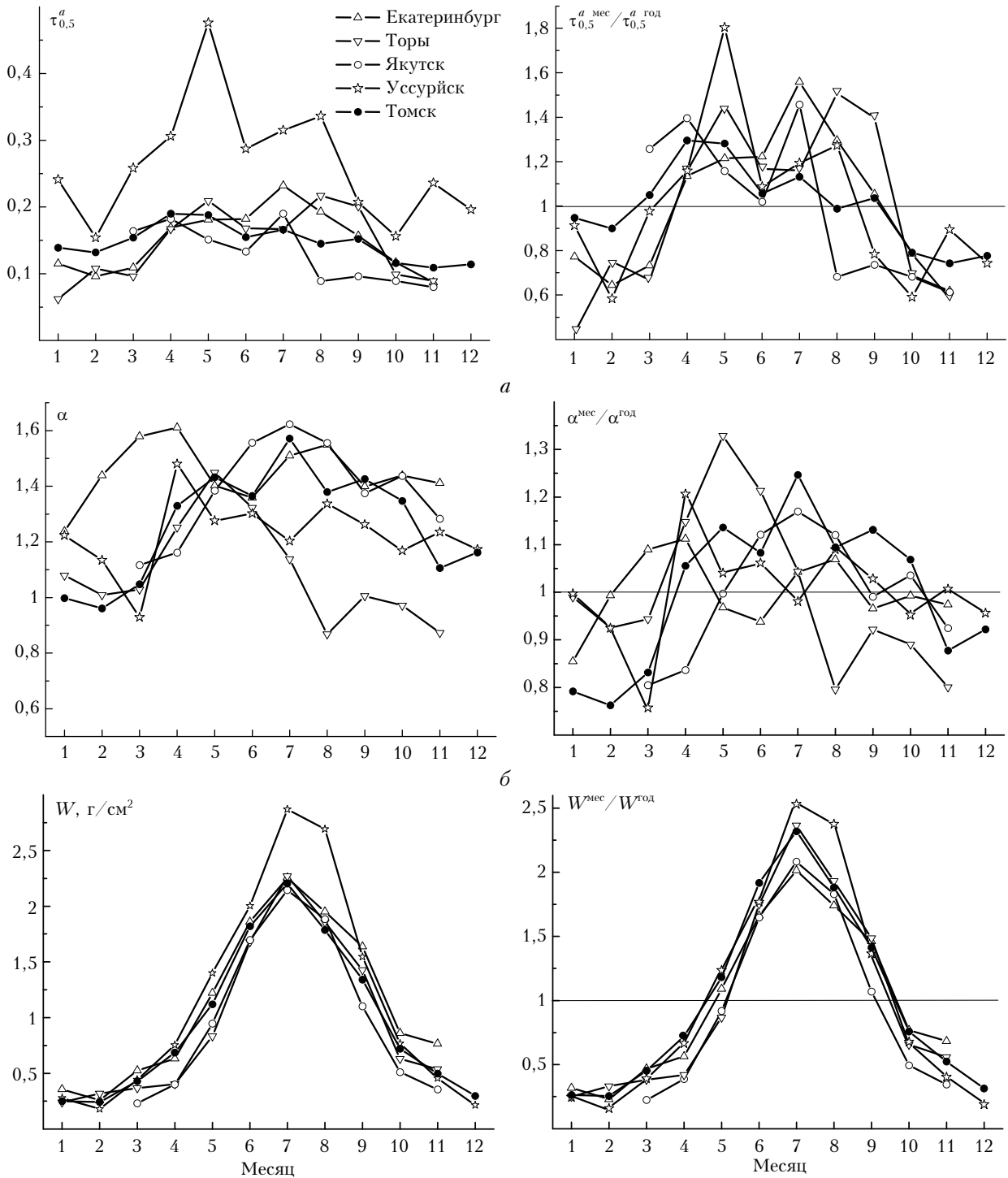


Рис. 2. Абсолютный и нормированный годовой ход АОТ (а), показателя селективности Ангрстрема α (б) и влагосодержания атмосферы W (в) в разных районах

Поведение трех характеристик отличается разными сроками перехода через среднегодовой уровень: сначала $\tau_{0,5}^a$ (март–сентябрь), затем показатель α (апрель–октябрь) и наконец влагосодержание (май–октябрь). Продолжительность повышенных значений $\tau_{0,5}^a$ и α составляет 7 мес, а влагосодержания 5 мес. Указанное различие обусловлено допол-

нительным всплеском аэрозольного замутнения весной, которого нет у влагосодержания. Для выяснения причин двойного максимума АОТ с локальным минимумом в июне необходимы дополнительные исследования. Предварительно можно предполагать, что характер годового хода τ_{λ}^a определяется наложением двух процессов:

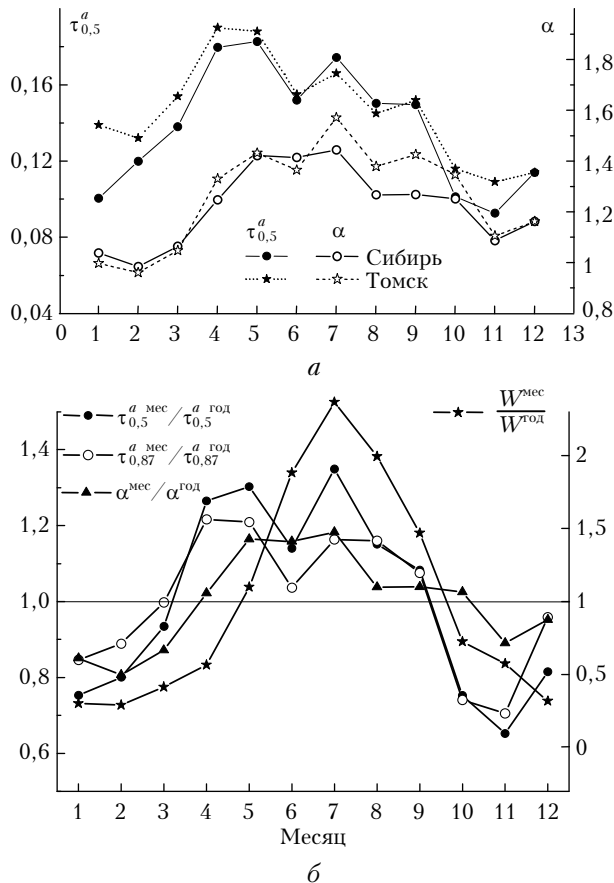


Рис. 3. Средний для Сибири абсолютный (а) и нормированный (б) годовой ход τ_{λ}^a , α , W и сравнение с более многолетними данными для Томска

а) годичным колебанием АОТ в результате роста (затем спада) генерации первичного и вторичного аэрозоля с наступлением теплого периода под влиянием смены состояния подстилающей поверхности, увеличения солнечной радиации, конвекции и турбулентности;

б) весенним (апрель–май) всплеском аэрозольного замутнения, который обусловлен высвобождением при таянии снега накопившегося аэрозольного материала, повышенной эмиссией органического аэрозоля в период цветения растений и грубодисперсного

аэрозоля с оголенной почвы, еще не покрытой растительностью.

Из рис. 3, а видно, что характеристики среднего для Сибири годового хода АОТ мало отличаются от результатов, полученных в Томске за более продолжительный период. Следовательно, данные АОТ для Томска в расширенном диапазоне спектра (0,37–4 мкм) можно использовать в качестве средних по Сибири значений τ_{λ}^a в разные периоды года. То, что по характеристикам замутнения атмосферы район Томска является типичным для Сибири, свидетельствуют и результаты спутниковых измерений. Анализ пространственного распределения $\tau_{0,55}^a$ и влажосодержания по данным спутникового сканера MODIS/TERRA (коллекция 5; <http://disc1.sci.gsfc.nasa.gov>) показал [21], что средние значения этих характеристик для территории Западной Сибири в летний период очень близки к данным измерений в районе Томска. Таким образом, количественные характеристики, представленные в табл. 2 и на рис. 3, можно рассматривать как модель годовой изменчивости АОТ атмосферы для типичных условий Сибири.

4. Оценки сезонной изменчивости восстановленных характеристик аэрозоля

Учитывая, что результаты восстановления микрофизических характеристик аэрозоля получены пока в недостаточном объеме, ограничимся оценками сезонной изменчивости, во-первых, только для района Томска и, во-вторых, с усреднением за 2(3)-месячные периоды, привязанные к характерным месяцам в годовом ходе АОТ атмосферы. Для других районов приведем только средние данные за весь период наблюдений. В качестве исходной информации использовались данные по версии обращения 2,0 и уровню обработки 2, т.е. до осени 2007 г. (см. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>). Разные версии методик обработки и погрешности восстановления микрофизических характеристик рассмотрены в работах [14, 15, 22].

В табл. 3 представлены средние значения (\pm СКО) основных характеристик аэрозоля для отдельных периодов года: 1) объемные концентрации

Таблица 3

Средние значения (\pm СКО) микрофизических параметров аэрозоля для периодов года (N_{VD} и N_{SSA} – количество дней измерений, в которые были восстановлены параметры микроструктуры и показателя преломления аэрозоля)

Период	Мода						N_{VD}	ω_0 (0,675 мкм)	N_{SSA}
	тонкодисперсная			грубодисперсная					
	C_{Vf}	r_f	σ_f	C_{Vc}	r_c	σ_c			
Апрель–май	0,05±0,05	0,16±0,03	0,41±0,05	0,04±0,05	2,57±0,62	0,74±0,08	54	0,899±0,036	15
Июнь–август	0,03±0,03	0,16±0,02	0,41±0,05	0,02±0,02	2,99±0,42	0,68±0,05	109	0,950±0,031	14
Октябрь–ноябрь	0,02±0,02	0,19±0,04	0,49±0,07	0,01±0,01	2,60±0,63	0,68±0,07	29	–	–
Зима	0,02±0,014	0,23±0,04	0,51±0,08	0,01±0,01	2,00±0,67	0,68±0,04	9	–	–
Томск/среднее	0,03±0,03	0,17±0,03	0,42±0,06	0,03±0,03	2,75±0,58	0,69±0,07	239	0,917±0,043	32
Якутск/среднее	0,02±0,02	0,17±0,03	0,43±0,05	0,01±0,03	2,59±0,62	0,70±0,08	154	0,967±0,023	7
Торы/среднее	0,02±0,02	0,18±0,03	0,44±0,07	0,01±0,02	2,19±0,69	0,69±0,08	44	0,914±0,030	3
Уссурийск/среднее	0,04±0,04	0,24±0,04	0,50±0,05	0,02±0,02	2,63±0,49	0,68±0,04	28	0,885±0,061	7
Коуровка/среднее	0,03±0,03	0,17±0,03	0,42±0,06	0,03±0,04	2,50±0,54	0,70±0,07	77	0,928±0,031	11

C_V ($\text{мкм}^3/\text{мкм}^2$), медианные радиусы r (мкм) и стандартное отклонение логнормальных распределений σ , тонкодисперсной (подстрочный символ f) и грубодисперсной (символ c) фракций частиц; 2) АОР аэрозоля — ω_0 ($0,675 \text{ мкм}$). Средний косинус индикатрисы аэрозольного рассеяния $\langle g \rangle$ (характеризует асимметрию, или вытянутость индикатрисы) на длинах волн $0,44, 0,675, 0,87$ и $1,102 \text{ мкм}$ приведен на рис. 4.

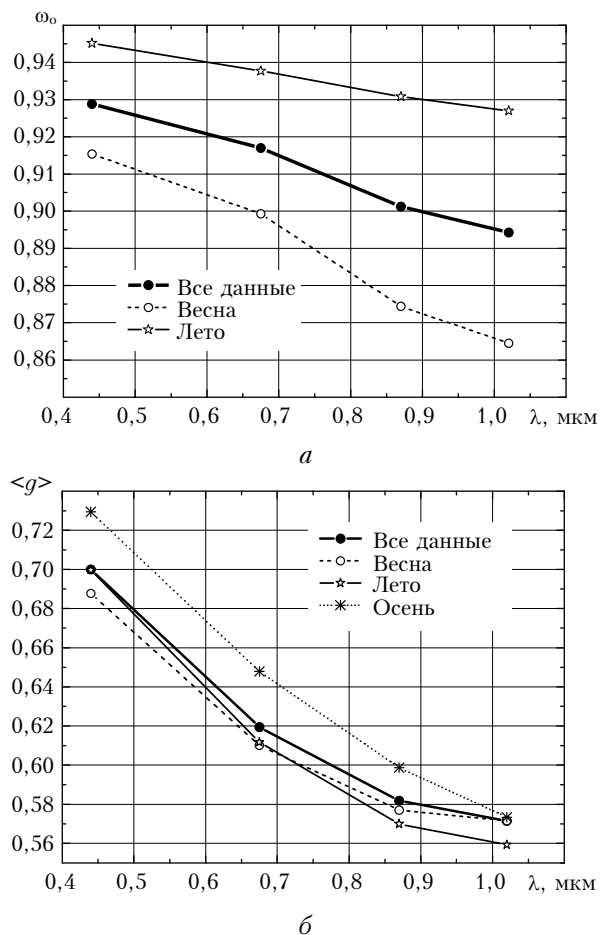


Рис. 4. Средние спектральные зависимости АОР аэрозоля ω_0 (а) и среднего косинуса индикатрисы рассеяния g (б) для отдельных периодов года в районе Томска

Заметим, что ω_0 и $\langle g \rangle$ определены для меньшего числа дней наблюдений, для относительно больших замутнений атмосферы (в основном $\tau_{0,5}^a > 0,3$) и имеют относительно большую погрешность.

Дисперсный состав оптически активных фракций аэрозоля, восстановленных при решении обратной задачи, представлен суммой двух логнормальных распределений частиц по объемам. Из табл. 3 видно, что объемные концентрации как тонкодисперсной (аккумулятивной), так и грубодисперсной фракций самые высокие весной, низкие в осенне-зимний период, а летом близки к среднегодовому уровню. Зимний период выделяется большим модальным радиусом (и более широким распределением) аккумулятивных частиц и минимальным размером грубодисперсных: величина r_c в 1,5 раза

меньше летних значений, а r_f имеет обратное соотношение.

Величина $\langle g \rangle$ и АОР аэрозоля характеризуются монотонным спадом с ростом длины волны (рис. 4). Самые низкие значения этих характеристик (максимальное поглощение аэрозоля при минимальной вытянутости индикатрисы) наблюдались в период весеннего максимума АОР. Например, АОР аэрозоля в области $0,44 \text{ мкм}$ весной составляет $0,915$, а летом $0,945$. Если рассматривать общий массив данных, то средние значения ω_0 и $\langle g \rangle$ составляют $0,93-0,9$ (в диапазоне $0,44-1,02 \text{ мкм}$) и $0,7-0,57$ соответственно. Сопоставление с другими (вне России) регионами [23] показывает, что наиболее близкие к Томску значения ω_0 и $\langle g \rangle$ наблюдаются в Crete-Paris (Франция): $0,94-0,91$ и $0,68-0,57$ соответственно.

Кроме сезонных значений, в табл. 3 (см. пять нижних строк) приведены средние характеристики аэрозоля за общий период наблюдений в различных районах. Сравнение средних характеристик позволяет предварительно выделить следующие отличительные особенности:

- 1) для Уссурийска характерны высокие значения концентрации, модального радиуса и ширины тонкодисперсной моды (в других районах эти характеристики примерно равны);
- 2) минимальными концентрациями грубодисперсного аэрозоля выделяются Якутск и п. Торы (в Торах, кроме того, самый малый модальный радиус крупных частиц);
- 3) самые низкие значения АОР аэрозоля (большое поглощение) в Уссурийске, максимальные в Якутске, а в остальных районах промежуточные значения.

Заключение

Проанализированы особенности сезонной изменчивости характеристик АОР атмосферы в нескольких районах азиатской части России. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. По результатам многолетних измерений τ_{λ}^a в районе Томска определены закономерности внутригодовой изменчивости основных характеристик: максимумы АОР в видимой области спектра наблюдаются в апреле ($\tau_{0,5}^a = 0,19$) и июле ($\tau_{0,5}^a = 0,17$), есть локальный минимум в июне ($\tau_{0,5}^a$ менее $0,16$), а минимальные замутнения — в октябре–ноябре ($\tau_{0,5}^a = 0,11$); показатель селективности Ангстрема имеет максимальные значения в июле ($\alpha = 1,51$) и минимальные зимой ($\alpha = 1,04$); у параметра β и АОР в ИК-диапазоне самые высокие значения наблюдаются в апреле ($\beta \sim 0,075$), низкие осенью ($\beta \sim 0,048$) и отсутствует летний максимум.

2. Сравнение годового хода АОР в Томске, рассчитанного по многолетнему (1995–2008 гг.) и более короткому периоду (2003–2008 гг.), показало малое отличие результатов, что дало основание для оценки закономерностей изменчивости в других регионах с менее продолжительными рядами наблюдений

(с 2003 г.). Отмечается близость сезонной изменчивости характеристик АОТ в районах Сибири (Томск, Якутск, п. Торы) и некоторые отличия в Приморье и Екатеринбурге.

3. Предложен средний для Сибири годовой ход τ_{λ}^a , который хорошо согласуется с многолетними данными в Томске (см. п. 1 заключения), измеренными в более широком диапазоне спектра (0,37–4 мкм). Отмечается общий характер годового колебания τ_{λ}^a , показателя Ангстрема α и влагосодержания атмосферы W – рост значений в теплый период и спад в холодный. Различия в поведении трех характеристик проявляются: а) в разной относительной амплитуде годового хода; б) в сроках перехода через среднегодовой уровень – сначала $\tau_{0,5}^a$ (март–сентябрь), затем α (апрель–октябрь) и влагосодержание (май–октябрь); в) в дополнительном весеннем всплеске АОТ, которого нет у показателя α и влагосодержания атмосферы.

4. Сравнение характеристик АОТ атмосферы с данными в других регионах умеренных широт показывает, что Томск является типичным районом бореальной зоны Евразии со слабым антропогенным воздействием. Среднегодовые характеристики аэрозоля в Томске имеют следующие значения: $\tau_{0,5}^a = 0,15$, в ИК-диапазоне $\tau_{\lambda}^a = 0,05 \div 0,06$, $\alpha = 1,26$, $\beta = 0,06$; объемные концентрации тонко- и грубодисперсного аэрозоля около $0,03 \text{ мкм}^3/\text{мкм}^2$, модальные радиусы $0,17$ и $2,75 \text{ мкм}$; АОР аэрозоля и средний косинус индикатрисы рассеяния (в области $0,44 \text{ мкм}$) около $0,93$ и $0,7$ соответственно.

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта СО РАН № 75.

1. *Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К.* Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ИК-области спектра. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 224 с.
2. *Гуцин Г.П.* Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 200 с.
3. *Махоткина Е.Л., Плахина И.Н., Лукин А.Б.* Некоторые особенности изменения мутности атмосферы на территории России в последней четверти XX века // Метеорол. и гидрол. 2005. № 1. С. 28–36.
4. *Ярхо Е.В.* Временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в различных климатических регионах // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1994. Т. 30. № 3. С. 417–424.
5. *Горбаренко Е.В.* Аэрозольная мутность атмосферы в Москве в конце XX века // Метеорол. и гидрол. 2003. № 7. С. 13–18.
6. *Горбаренко Е.В., Ерохина А.Е., Лукин А.Б.* Многолетние изменения аэрозольной оптической толщи атмосферы в России // Метеорол. и гидрол. 2006. № 7. С. 41–48.
7. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Спектральная зависимость аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра $0,34\text{--}4 \text{ мкм}$ // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 2. С. 156–164.
8. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* О взаимосвязях параметров формулы Ангстрема и аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра $1\text{--}4 \text{ мкм}$ // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 3. С. 222–228.

9. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А.* Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1162–1169.
10. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С.* Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонент атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 4. С. 354–360.
11. *Сакерин С.М., Горбаренко Е.В., Кабанов Д.М.* Особенности многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщи атмосферы и оценки влияния различных факторов // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 7. С. 625–631.
12. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Польшкин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тащилин М.А.* Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 968–975.
13. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakadjima 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.
14. *Dubovik O.T., King M.* A flexible inversion algorithm for retrieval aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105. N 16. P. 20673–20696.
15. *Dubovik O., Smirnov A., Holben B., King M., Kaufman Y., Eck T., Slutsker I.* Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105. N 8. P. 9791–9806.
16. *Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F., Dubovik O., Slutsker I.* Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET data base // Remote Sens. Environ. 2000. V. 73. Iss. 3. P. 337–349.
17. *Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С.* Информационная система для сетевых солнечных фотометров // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22. № 1. С. 61–67.
18. *Weller M., Schulz E., Leiterer U., Naebert T., Herber A., Thomason L.W.* Ten years of aerosol optical depth observation at the Lindenberg meteorological observatory // Contrib. Atmos. Phys. 1998. V. 71. N 4. P. 387–400.
19. *Holben B.N., Tanre D., Smirnov A., Eck T.F., Slutsker I., Abuhassan N., Newcomb W.W., Schafer J.S., Chatenet B., Lavenu F., Kaufman Y.J., Vande Castle J., Setzer A., Markham B., Clark D., Frouin R., Halt-hore R., Karneli A., O'Neill N.T., Pietras C., Pinker R.T., Voss K., Zibordi G.* An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106. N 11. P. 12,067–12,097.
20. *Smirnov A., O'Neill N.T., Royer A., Tarussov A.* 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.
21. *Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Фирсов К.М.* Моделирование прямого радиационного форсинга аэрозоля для типичных летних условий Сибири. Часть 1: Метод расчета и выбор входных параметров // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22. № 2. С. 163–172.

22. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Smirnov A., Sinyuk A., Schafer J., Giles D., Dubovik O. AERONET's version 2.0 quality assurance criteria // Proc. SPIE. 2006. 6408, 64080Q.

23. Dubovik O., Holben B., Eck T., Smirnov A., Kaufman Y.J., King M.D., Tanre D., Slutsker I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. Iss. 3. P. 590–608.

S.M. Sakerin, S.A. Beresnev, S.Yu. Gorda, D.M. Kabanov, G.I. Kornienko, Yu.I. Markelov, A.V. Mikhailev, S.V. Nikolashkin, M.V. Panchenko, V.A. Poddubnyi, V.V. Pol'kin, A. Smirnov, M.A. Tashilin, S.A. Turchinovich, Yu.S. Turchinovich, B. Holben, T.A. Eremina. **Characteristics of annual behavior of spectral aerosol optical depth of the atmosphere under conditions of Siberia.**

Based on the many-year observations in Tomsk (since 1995 in wavelength range 0.37–4 μm) and other regions of the Asian part of Russia (2003–2008), we determined the specific features in the annual behavior of characteristics of the spectral aerosol optical depth (AOD) of the atmosphere. It is shown that the maxima of AOD are observed in April (0.19 in the region 0.5 μm) and July, local minimum (less than 0.16) in June, and minimum values (0.12) in fall. The seasonal variations of the Angstrom selectivity parameter is characterized by elevated values in the warm period (maximum in July) and low values in winter. We indicated the closeness of the seasonal variations of aerosol turbidity in three Siberian regions and suggested Siberia-mean annual behavior of the AOD characteristics. Average values of the optical and microphysical aerosol characteristics of the atmospheric depth are presented for characteristic periods of intra-annual AOD variations.