

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.521.3, 535.361.1

**Особенности многолетней изменчивости аэрозольной
оптической толщины атмосферы и оценки влияния
различных факторов**

Сергей Михайлович Сакерин¹, Екатерина Валентиновна Горбаренко²,
Дмитрий Михайлович Кабанов¹

¹ *Институт оптики атмосферы СО РАН, лаборатория оптики аэрозоля
634055, г. Томск, пл. акад. Зюева, 1
sms@iao.ru, dkab@iao.ru*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии
119899, г. Москва, Воробьевы горы, ГПС-3
catgor@mail.ru*

Поступила в редакцию 31.01.2008 г.

По данным многолетних (1992–2007 гг.) наблюдений прозрачности атмосферы в районе Томска анализируются спектральные особенности межгодовой изменчивости аэрозольной оптической толщины (АОТ) в видимой и ближней ИК-областях спектра. Приводятся статистические характеристики спектральных АОТ и параметров Ангстрема, и обсуждаются причины межгодовых колебаний. По результатам сопоставления с данными в других регионах в поствулканический период (с 1994 г.) отмечаются отсутствие значимого тренда и малое отличие АОТ в трех достаточно разных районах России (Москва, ст. Бугрино, Томск). Для района Москвы обсуждаются характеристики тренда для более длительного периода — с 1955 по 2007 г. Показано, что в многолетней изменчивости АОТ во всех рассматриваемых районах не проявляется прямой значимой связи с циклами солнечной активности.

Ключевые слова: аэрозольно-оптическая толщина, тренд, вулканы.

Введение

Для выяснения причин современных изменений климата необходим анализ многолетней изменчивости радиационно-значимых компонентов геоферы во взаимосвязи с глобальными факторами, которые могут оказать то или иное воздействие. Среди атмосферных компонентов важную роль (наряду с парниковыми газами и облачностью) играет аэрозоль, а основной характеристикой его радиационного взаимодействия является аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы.

Межгодовая изменчивость характеристик аэрозольной мутности атмосферы на территории России анализировалась многими авторами [1–4 и др.]. Наиболее продолжительные ряды АОТ атмосферы, восстановленные по актинометрическим наблюдениям для длины волны 0,55 мкм [5], подробно обсуждались в работах [6–8 и др.]. Было несколько причин вновь вернуться к данному вопросу. Во-первых, необходимо выяснить спектральные особенности изменения АОТ в условиях конкретного региона, во-вторых, уточнить количественные характеристики изменения АОТ с учетом последних

данных (до 2007 г. включительно) и, в-третьих, сравнить данные для типичных районов европейской и азиатской частей России.

Кроме того, была необходимость отреагировать на ряд публикаций (см., например, [9, 10]), авторы которых увязывают значительные увеличения аэрозольного замутнения в начале 80-х и 90-х гг. с циклами солнечной активности. Добавим, что в дискуссиях на различных конференциях продолжают делаться ссылки на проявление такой закономерности в многолетнем ходе АОТ.

1. Межгодовая изменчивость спектральных АОТ в районе Томска

Измерения спектральной прозрачности атмосферы в области спектра 0,37–1,06 мкм были начаты в Томске в 1992 г. и проводились отдельными циклами (2–3 мес) преимущественно в теплый период. Начиная с 2000 г. наблюдения стали круглогодичными, а спектральный диапазон был расширен до 4 мкм [11]. Характеристики используемых солнечных фотометров и методик расчета АОТ — τ_{λ}^a — представлены в работах [12, 13].

Для оценки межгодовой изменчивости спектральных АОТ атмосферы воспользуемся более продолжительным рядом летних наблюдений. По полученным данным сначала рассчитывались средние τ_λ^a для отдельных дней измерений, а затем – среднемесячные и летние значения для каждого года. АОТ атмосферы определялась на многих длинах волн, для краткости рассмотрим следующие характеристики: 1) значения τ_λ^a для трех участков в коротковолновой области спектра; 2) параметры α , β формулы Ангрстрема $\tau^a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$; 3) оценки грубодисперсной τ_c и мелкодисперсной τ_f (в области 0,5 мкм) компонент АОТ. Относительно методики определения двух компонент АОТ сделаем пояснение.

В нашей работе [14] показано, что АОТ атмосферы в диапазоне спектра 1–4 мкм, а также грубодисперсная компонента АОТ близки к значению параметра β и связаны с ним линейной зависимостью. Например, для летних условий величину τ_c можно оценить по формуле $\tau_c = 0,01199 + 0,706\beta$. Соответственно, мелкодисперсная компонента τ_f рассчитывается как остаточная от общей толщины для заданной длины волны: $\tau_f = \tau_{0,5}^a - \tau_c$.

Многолетний ход перечисленных характеристик АОТ атмосферы в районе Томска показан на рис. 1.

Изменение характеристик (уменьшение АОТ и рост α) в первый период (с 1992 по 1994 г.) было связано с очищением стратосферы от продуктов извержения влк. Пинатубо (подробнее см. ниже). Нестабильность данных на среднем участке в определенной степени обусловлена эпизодичностью наших наблюдений в то время (пропуски измерений в 1996 и 1998 гг.).

Подробнее рассмотрим характеристики АОТ в последние 9 лет, когда измерения проводились

более регулярно (круглогодично) и во всех случаях, когда Солнце не закрыто облаками. Статистические характеристики для этого периода приведены в табл. 1: средние значения, среднеквадратические отклонения σ и коэффициенты вариаций $V = (\sigma/\bar{x})$. С учетом того, что закон распределения τ_λ^a отличается от нормального (близок к логнормальному), дополнительно были определены наиболее вероятные (модальные) значения всех характеристик. Из табл. 1 и рис. 2 видно, что распределение АОТ асимметричное – вероятные значения меньше средних примерно на 30%.

Частотное распределение показателя селективности Ангрстрема ближе к нормальному, среднее значение α для летних условий Томска составляет 1,45.

Общий диапазон изменения АОТ за 9-летний период составил довольно заметную величину: например, $\tau_{0,5}^a$ менялась от минимального значения 0,107 в 2001 г. до максимального 0,19 в 2005 г. Во временном ходе АОТ просматриваются волнообразные колебания с периодами около 3 лет, и пока нет оснований для выделения трендовой составляющей. Межгодовые колебания τ_λ^a более выражены в коротковолновой части спектра и уменьшаются с ростом длины волны. Минимальная относительная изменчивость характерна для грубодисперсной компоненты τ_c , а максимальная – для мелкодисперсной компоненты τ_f , т.е. преобладающую роль в изменчивости АОТ играет субмикронный аэрозоль. Следует также отметить, что характер многолетнего хода τ_λ^a согласуется с изменением среднегодовых значений массовой концентрации субмикронного аэрозоля в приземном слое [15]: максимумы в 1999, 2003, 2005 гг. и минимальное значение в 2001 г.

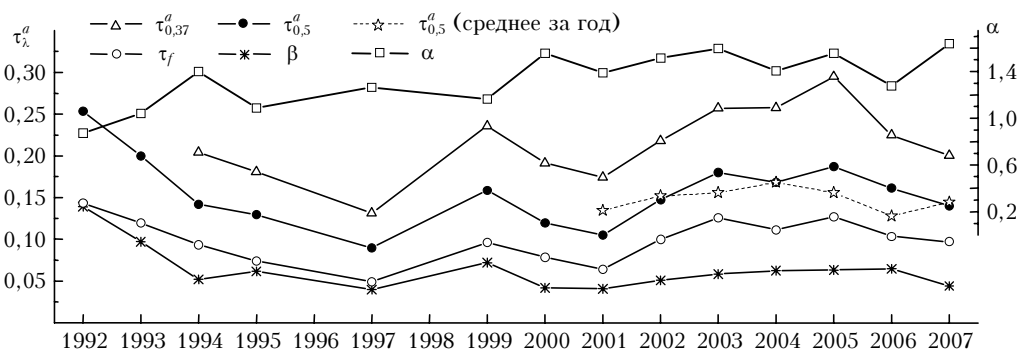


Рис. 1. Межгодовая изменчивость характеристик АОТ: $\tau_{0,37}^a$, $\tau_{0,5}^a$, α , β и τ_f (пунктиром показано изменение среднегодовых значений $\tau_{0,5}^a$)

Таблица 1

Статистические характеристики АОТ в районе Томска в период 1999–2007 гг.

| Характеристика | $\tau_{0,37}^a$ | $\tau_{0,5}^a$ | $\tau_{0,55}^a$ | $\tau_{0,87}^a$ | α | β | τ_c | τ_f |
|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------|---------|----------|----------|
| Среднее | 0,229 | 0,152 | 0,133 | 0,068 | 1,45 | 0,056 | 0,052 | 0,10 |
| σ | 0,060 | 0,040 | 0,036 | 0,019 | 0,21 | 0,016 | 0,013 | 0,031 |
| V | 26,2 | 26,3 | 27 | 27,9 | 14,5 | 28,6 | 25 | 31 |
| Мода | 0,17 | 0,11 | 0,09 | 0,045 | 1,50 | 0,035 | 0,038 | 0,05 |

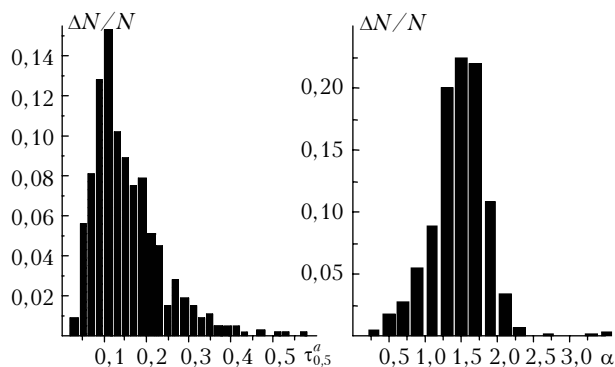


Рис. 2. Гистограммы распределений $\tau_{0,5}^a$ и показателя α в летние периоды 1999–2007 гг.

Основными причинами межгодовых колебаний АОТ в поствулканический период, по нашему мнению, являются: 1) неустойчивость циркуляций и синоптических условий; 2) разная частота и интенсивность массовых лесных пожаров, характерных для бореальной зоны. В качестве подтверждения приведем данные Томской базы «Авиалесоохраны» для пожароопасных сезонов (май – сентябрь): максимумы очагов и площади лесных пожаров были в 1999, 2003, 2004 гг., минимумы в 2001, 2002, 2007 гг.

Что касается синоптических условий, то по данным [16] аномальными для района Томска были 2001 и 2003 гг. Например, лето 2001 г. можно считать «циклоническим»: повторяемость циклонов была в 2 раза выше, чем в соседние годы, а количество антициклонов заметно ниже, чем за многолетний период. При циклонической погоде чаще наблюдаются осадки, которые вымывают аэрозоль, снижают вероятность лесных пожаров и, как следствие, приводят к повышению прозрачности атмосферы. Перечисленные особенности согласуются с характером изменения АОТ на рис. 1.

Рассмотренная многолетняя изменчивость АОТ относится к летнему периоду измерений, поэтому представляло интерес оценить степень отличия средних летних и годовых значений АОТ. Такое сравнение было проведено для периода круглогодичных наблюдений (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение среднегодовых и средних летних данных в районе Томска (2001–2007 гг.)

| Средние характеристики | $\tau_{0,37}^a$ | $\tau_{0,55}^a$ | $\tau_{0,87}^a$ | α |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|
| Год | 0,217±0,020 | 0,128±0,023 | 0,073±0,009 | 1,31±0,17 |
| Лето | 0,233±0,040 | 0,136±0,023 | 0,068±0,012 | 1,49±0,12 |
| Отличие (год–лето), % | -7,12 | -5,75 | 7,27 | -13,1 |

Из приведенных данных следует, что различие АОТ в большей степени проявляется на краях спектрального диапазона вследствие сезонной изменчивости селективности спектрального хода АОТ

(см. изменение показателя α). В середине видимой области спектра отличие летних АОТ от годовых невелико: чаще летние значения больше годовых (см. пунктирную кривую на рис. 1) и среднее превышение составляет менее 6%. Следовательно, для условий Томска средние АОТ в летний период можно использовать в качестве оценки среднегодовых (с учетом поправки на 6%).

Вместе с тем из-за меньшего масштаба усреднения средние летние данные более подвержены влиянию различных факторов (например, лесных пожаров) и испытывают большие межгодовые колебания. Заметим также, что в Москве различие летних и годовых значений АОТ довольно значительно – в последние годы в среднем составляет 27%. Это обусловлено тем, что в крупных городах амплитуда сезонных колебаний и летние значения АОТ (в сравнении с годовыми) выше, чем в более чистых районах – на северо-востоке европейской части России и в центральных районах Сибири [4, 8].

2. Сопоставление изменчивости АОТ в разных районах в период 1990–2007 гг.

Рассмотрим, насколько данные изменчивости АОТ в Томске (56,5° с.ш., 85° в.д.), представляющем типичный район Сибири, согласуются с данными в других регионах. В наших экспериментах мы не ставили задачу анализа пространственных неоднородностей аэрозольного замутнения, которые подробно рассматривались в работах [4, 8, 17]. Поэтому ограничимся сравнением результатов только с тремя типичными районами в разных климатических зонах, а именно: 1) Метеорологической обсерватории МГУ (55,7° с.ш., 37,5° в.д.); 2) актинометрической ст. Бугрино (68,8° с.ш., 49,3° в.д.; использованы данные из работы [8]); 3) антарктической ст. Мирный (66,3° ю.ш., 93° в.д.; использованы данные [18, 19]). Выбор в качестве примера высокоширотной ст. Бугрино (о. Колгуев) был обусловлен тем, что корреляция АОТ с солнечной активностью указывалась авторами [9] именно для высоких широт.

Временной ход АОТ атмосферы в указанных районах вместе с данными о солнечной активности – числами Вольфа R (<http://sidc.oma.be/html/sunspot.html>), приведен на рис. 3.

Анализ результатов показывает, что, несмотря на различие районов исследований и методов определения АОТ (по спектральной [12] и интегральной прямой радиации [15]), основная закономерность изменения аэрозольного замутнения в рассматриваемый период одинакова: всплеск АОТ в 1991–1994 гг. и малое изменение в последующие годы. Подчеркнем, что эта закономерность проявилась на всех широтах и во всех регионах планеты, о чем свидетельствуют временной ход $\tau_{0,5}^a$ в Антарктиде.

Данные многочисленных исследований (фотометрические, лидарные, самолетные, баллонные

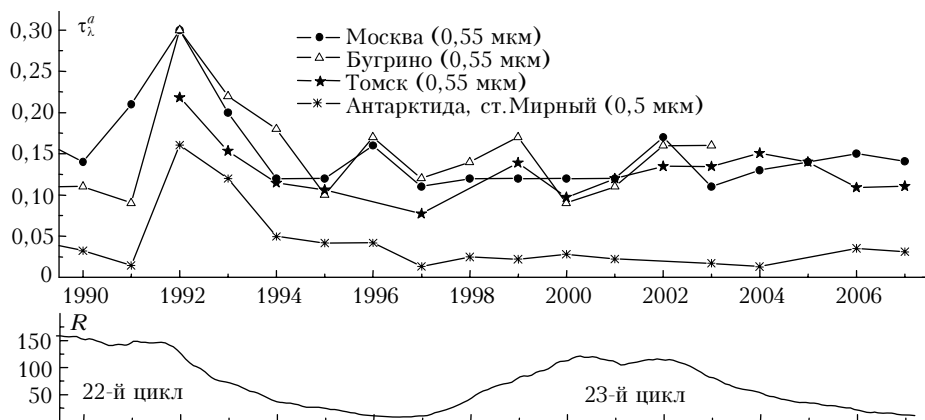


Рис. 3. Временный ход АОТ атмосферы в разных районах и солнечной активности R

[20–23 и др.) показали, что увеличение АОТ произошло за счет образования в стратосфере аэрозоля (общей массой 20–30 Мт) после извержения влк. Пинатубо и максимальное увеличение АОТ достигало 0,01–0,02 [21–24]. По химическому составу и общей массе аэрозоля, срокам и хронологии развития стратосферного слоя это событие никак нельзя идентифицировать с прямым воздействием солнечной активности. Кроме того, кажущаяся «связь» в 22-м цикле солнечной активности в явном виде не проявилась в следующем 23-м цикле, поэтому для обоснованного доказательства необходим анализ более длительных рядов наблюдений.

В последующий период (с 1994 г.) АОТ в рассматриваемых районах варьировала около своих средних значений и значимого тренда не наблюдалось. Характерным для данного периода является малое отличие аэрозольного замутнения в трех достаточно разных районах России (Москва, ст. Бугрино, Томск). Средние значения и среднеквадратичские отклонения АОТ в поствулканический период составили: в Москве – $0,131 \pm 0,019$; на ст. Бугрино (1994–2003 гг.) – $0,14 \pm 0,033$; в Томске летом – $0,126 \pm 0,025$ (годовые $0,119 \pm 0,021$). В отдельные годы наблюдалась синхронная изменчивость АОТ в двух или трех пунктах наблюдений, например совпадение максимумов замутнения в 1996, 1999 и 2002 гг.

3. Особенности многолетней изменчивости

В настоящее время наиболее мощным и всесторонне доказанным фактором многолетней изменчивости АОТ считаются взрывные вулканические извержения [25, 26 и др.], во время которых пробивается тропопауза и в стратосферу выбрасываются десятки Мегатонн аэрозолеобразующего вещества (в основном сернистого газа). Именно взрывные извержения имеют глобальный характер, и последующий сток аэрозоля продолжается в течение 2–3 лет.

Более слабые извержения вулканов приводят к увеличению аэрозольного замутнения в региональном масштабе и на более короткие периоды. Среди других возможных причин межгодовых колебаний и трендов АОТ отмечают: неустойчивость общей циркуляции атмосферы, явление Эль-Ниньо, изменение антропогенной нагрузки, циклы солнечной активности и др. При обнаружении связей с этими явлениями (факторами), безусловно, необходимо сначала учесть вклад вулканического аэрозоля.

На рис. 4 представлен временной ход $\tau_{0,55}^a$ в Москве с 1955 по 2007 г. – самый продолжительный ряд наблюдений на территории России.

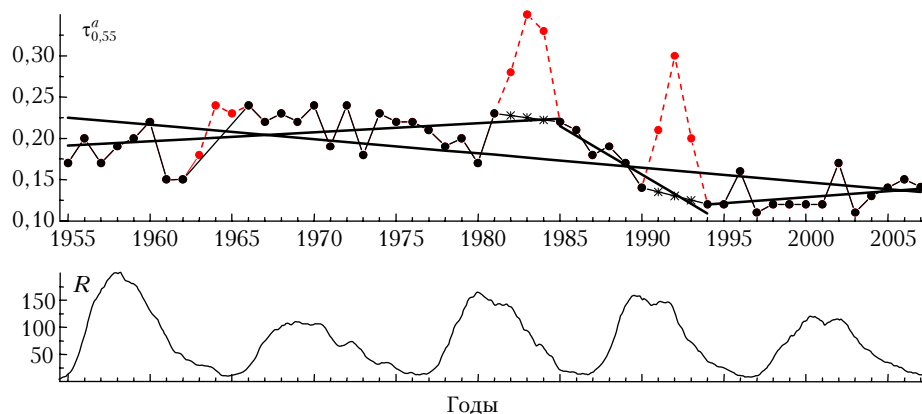


Рис. 4. Многолетняя изменчивость $\tau_{0,55}^a$ (Москва, 1955–2007 гг.) и солнечной активности R (жирными прямыми линиями показаны линейные тренды для отдельных периодов)

В межгодовой изменчивости хорошо видны всплески АОТ (выделены пунктиром) после трех наиболее мощных извержений вулканов: Агунг – 1963 г., Эль-Чичон – 1982 г., Пинатубо – 1991 г. Влияние вулканов наиболее просто учесть, если заменить повышенные замутнения, действующие в течение ~ 3 лет, на средние значения АОТ в соседний невозмущенный период – перед извержением и спустя 2–3 года. (Скорректированные значения $\tau_{0,55}^a$ отмечены на рис. 4 звездочками).

В данном случае мы ограничились исключением вулканической добавки только для двух наиболее очевидных ситуаций – влк. Пинатубо и Эль-Чичон. Однозначно учесть влияние влк. Агунг было затруднено, так как далее последовали извержения других вулканов – Фернандина, Фуэго, Сент-Хеленс, Алайд.

Полученный ряд значений $\tau_{0,55}^a$ был сопоставлен с данными солнечной активности. Коэффициент взаимной корреляции $\tau_{0,55}^a$ и R составил малую величину 0,034, которая ниже уровня значимой корреляции 0,269 с доверительной вероятностью 0,95.

Впрочем, и без исключения вулканической добавки коэффициент корреляции этих двух характеристик не превышает 0,04.

Для оценки наличия связи дополнительно был проведен спектральный анализ межгодовых колебаний АОТ. В полученном спектре амплитуд A (рис. 5) проявляются гармоники с периодами около 3; 5; 8,7 года и отсутствуют колебания, соответствующие циклам солнечной активности (10–11 лет).

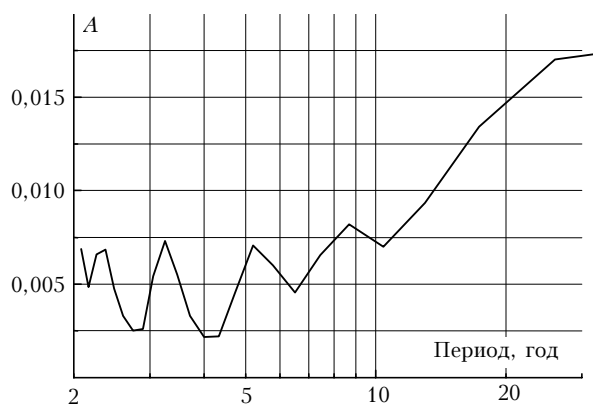


Рис. 5. Периодограмма межгодовых вариаций $\tau_{0,55}^a$ для района Москвы

Интерпретация характерных периодов колебаний АОТ является предметом отдельного исследования. Отметим лишь, что выделенные гармоники согласуются с известными циклами циркуляций в системе «океан – атмосфера» [27, 28 и др.].

Таким образом, проведенный анализ показал, что прямой статистически значимой связи АОТ с циклами солнечной активности в последний полувековой период не наблюдалось. В то же время нет оснований отрицать опосредованное влияние на аэрозольную компоненту прозрачности солнечной активности или космических лучей, например через циркуляцию [28–30]. «Солнечное» воздействие на перестройку циркуляций и облачность сейчас активно обсуждается наряду с другими механизмами [27, 31 и др.]. В любом случае такое воздействие ниже вулканического и замаскировано проявлениями многих факторов, включая изменение региональных условий (пожары, антропогенная нагрузка). Совокупное влияние всех факторов на межгодовую изменчивость АОТ можно характеризовать средеквадратическим отклонением, которое в рассмотренный период составило 0,035. К сожалению, авторы гипотез о значительном влиянии космофизических агентов именно на прозрачность атмосферы [32–34] не используют для доказательства имеющиеся продолжительные ряды наблюдений, а приводят примеры отдельных событий или косвенных фактов.

В заключение рассмотрим трендовую составляющую многолетнего хода АОТ, которая для отдельных периодов оценивалась в работах [4, 7, 8]. Если исключить вулканическое влияние, то за период 1955–2007 г. в Москве наблюдался значимый отрицательный тренд $\tau_{0,55}^a$. (Значимым считался тренд, доверительная вероятность которого $P \geq 95\%$). Из рис. 4 видно, что основной спад АОТ произошел в период с 1985 по 1994 г. Поэтому в поведении аэрозольной мутности правильнее выделить три участка: 1) 1955–1985 гг. – период возрастающей промышленной нагрузки в Москве с тенденцией увеличения АОТ; 2) 1985–1994 гг. – значительный отрицательный тренд, в основном связанный с резким спадом промышленного производства не только в Москве, но и в регионе в целом; 3) 1994–2007 гг. – отсутствие значимого тренда (слабая тенденция увеличения АОТ без значимого тренда).

Количественные характеристики тренда для указанных периодов приведены в табл. 3.

Таблица 3

| Характеристики линейного тренда $\tau_{0,55}^a$ для различных периодов наблюдений | | | | | | | |
|---|-----------------|---------|-------|----------|--------------|------|-----|
| Период | $\tau_{0,55}^a$ | a | b | Δ | $\Delta, \%$ | P | n |
| 1955–2007 | 0,180 | –0,0017 | 0,227 | –0,089 | –39 | > 99 | 53 |
| 1955–1985 | 0,207 | 0,0011 | 0,190 | 0,033 | 17 | > 95 | 31 |
| 1985–1994 | 0,162 | –0,0118 | 0,227 | –0,106 | –49 | > 99 | 10 |
| 1994–2007 | 0,131 | 0,00145 | 0,120 | 0,019 | 15,5 | < 95 | 14 |

Примечание. a и b – коэффициенты уравнения тренда $y = ax + b$; $\Delta y = y_n - y_1$ – общее линейное изменение $\tau_{0,55}^a$; $\Delta, \%$ – относительная величина тренда; P – доверительная вероятность тренда; n – число лет.

Таким образом, в последнее десятилетие аэрозольная мутность в Москве, других регионах России [4, 8, 17] и Томске характеризуется отсутствием значимого тренда, низкими значениями АОТ, сближением АОТ в городских и фоновых районах. Такое поведение АОТ связано с сокращением антропогенных выбросов, отсутствием крупных вулканических извержений [35] и «благоприятным» влиянием других природных факторов, не приводящих к увеличению общего содержания аэрозоля в региональном и глобальном масштабах.

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта СО РАН № 3.23.

1. *Гущин Г.П.* Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 200 с.
2. *Русина Е.Н., Боброва В.К., Ламакин М.В.* Результаты контроля аэрозольного ослабления на российских станциях фонового мониторинга // Труды ГГО. 1998. Вып. 549. С. 157–170.
3. *Байкова И.М.* Особенности многолетнего изменения коэффициента прозрачности атмосферы и составляющих солнечной радиации в Сибири и на Дальнем Востоке в 1967–1986 годах // Метеорол. и гидрол. 1998. № 1. С. 29–35.
4. *Плахина И.Н., Махоткина Е.Л., Панкратова Н.В.* Вариации аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории России в 1976–2003 гг. // Метеорол. и гидрол. 2007. № 2. С. 19–29.
5. *Тарасова Т.А., Ярхо Е.В.* Определение аэрозольной оптической толщины атмосферы по измерениям прямой интегральной радиации // Метеорол. и гидрол. 1991. № 12. С. 66–71.
6. *Абакумова Г.М., Ярхо Е.В.* Изменения аэрозольной оптической толщины атмосферы в Москве за последние 37 лет // Метеорол. и гидрол. 1992. № 11. С. 107–113.
7. *Горбаренко Е.В.* Аэрозольная мутность атмосферы в Москве в конце XX века // Метеорол. и гидрол. 2003. № 7. С. 13–18.
8. *Горбаренко Е.В., Ерохина А.Е., Лукин А.Б.* Многолетние изменения аэрозольной оптической толщины атмосферы в России // Метеорол. и гидрол. 2006. № 7. С. 41–48.
9. *Ролдугин В.К., Старков Г.В.* Изменение прозрачности атмосферы в 11-летнем цикле солнечной активности // Докл. РАН. 2000. Т. 370. № 5. С. 675–677.
10. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Рассказчикова Т.М., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Роль солнечной активности в многолетней изменчивости фотохимических компонентов воздуха в нижней тропосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 12. С. 1056–1072.
11. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Спектральная зависимость аэрозольной оптической толщины атмосферы в области спектра 0,34–4 мкм // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 2. С. 156–164.
12. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* О методике определения аэрозольной оптической толщины атмосферы в ближнем ИК-диапазоне спектра // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 8. С. 866–875.
13. *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.
14. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* О взаимосвязях параметров формулы Ангстрема и аэрозольной оптической толщины атмосферы в области спектра 1–4 мкм // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 3. С. 222–228.
15. *Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П.* Временная изменчивость содержания субмикронного аэрозоля и сажи в приземном слое атмосферы Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 12. С. 1082–1085.
16. *Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Складнева Т.К.* Синоптический режим Томска за 1993–2004 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 10. С. 887–892.
17. *Горбаренко Е.В.* Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории СССР // Метеорол. и гидрол. 1997. № 5. С. 36–44.
18. *Радионов В.Ф., Ламакин М.В., Хербер А.* Изменения аэрозольной оптической толщины атмосферы в Антарктиде // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2002. Т. 38. № 2. С. 205–210.
19. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Панченко М.В., Польшин В.В., Тихомиров А.Б., Власов Н.И., Радионов В.Ф., Смирнов А.В., Холбен Б.Н., Слуцкер И.А., Голобокова Л.П.* Результаты исследований характеристик аэрозоля в 52-м РАЭ // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 77. С. 65–67.
20. *Stove L.L., Carey R.H., Pellegrino P.P.* Monitoring the Mt. Pinatubo aerosol layer with NOAA/11 AVHRR data // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. N 2. P. 159–162.
21. *Кондратьев К.Я.* Комплексный мониторинг извержения вулкана Пинатубо // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 1. С. 111–122.
22. *Russel P.B., Livingston J.M., Pueschel R.F., Bauman J.J., Pollack J.B., Brooks S.L., Hamill P., Thomson L.W., Stove L.L., Deshler T., Dutton E.G., Bergstrom R.W.* Global to microscale evolution of the Pinatubo volcanic aerosol derived from diverse measurements and analyses // J. Geophys. Res. D. 1996. V. 101. N 13. P. 18.745–18.763.
23. *Stothers R.B.* Major optical depth perturbations to the stratosphere from volcanic eruptions: Pyrheliometric period, 1881–1960 // J. Geophys. Res. D. 1996. V. 101. N 2. P. 3901–3920.
24. *Зув В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д.* Стратосферный аэрозольный слой над г. Томском (56,5° с.ш., 85,0° в.д.) по результатам наблюдений на Сибирской лидарной станции в 1986–1997 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12. № 3. С. 268–274.
25. *Кондратьев К.Я.* Вулканы и климат. Итоги науки и техники. Метеорология и климатология. Т. 13. М.: ВИНТИ, 1992. 204 с.
26. *Bryson R.A., Goodman B.M.* Volcanic Activity and Climatic Changes // Science. 1980. V. 207. N 4435. P. 1041–1044.
27. *Монин А.С., Шишков Ю.А.* Циркуляционные механизмы колебаний климата атмосферы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2000. Т. 36. № 1. С. 27–34.
28. *Гурс А.А.* Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеониздат, 1971. 280 с.
29. *Веретененко С.В., Пудовкин М.И.* Вариации прихода суммарной радиации как возможный энергетический источник долгопериодных эффектов солнечной активности в атмосферной циркуляции // Геомагнетизм и аэрон. 2000. Т. 40. № 1. С. 77–83.

30. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Роль солнечной и геомагнитной активности в изменении климата Земли // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 10. С. 887–892.
31. Дзюба А.В., Панин Г.Н. Механизмы формирования многолетних направленных изменений климата в прошедшем и текущем столетиях // Метеорол. и гидрол. 2007. № 5. С. 5–27
32. Распопов О.М., Шумилов О.И., Касаткина Е.А. Космические лучи как главный фактор влияния солнечной вариабельности на климатические и атмосферные параметры // Биофизика. 1998. Т. 43. Вып. 5. С. 902–908.
33. Шумилов О.И., Касаткина Е.А., Распопов О.М., Турунен Е., Якоби Г. Оценка климатического отклика на вариации солнечной и вулканической активности // Геомагнетизм и аэрон. 2000. Т. 40. № 1. С. 77–83.
34. Огурцов М.Г. Вековая вариация в аэрозольной прозрачности атмосферы как возможное звено, связывающее долговременные изменения солнечной активности и климата // Геомагнетизм и аэрон. 2007. Т. 47. № 1. С. 126–137.
35. Зуев В.В., Баженов О.Е., Бурлаков В.Д., Невзоров А.В. Долговременные тренды, сезонные и аномальные изменения фонового стратосферного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 1. С. 42–47.

S.M. Sakerin, E.V. Gorbarenko, D.M. Kabanov. Peculiarities of many-year variations of atmospheric aerosol optical depth and estimates of influence of different factors.

Data of many-year (1992–2007) observations of atmospheric transparency in the region of Tomsk are used to analyze spectral features of the interannual variations of aerosol optical depth (AOD) in the visible and near-IR spectral ranges. We present statistical characteristics of the spectral AOD and Angstrom parameters and discuss the causes of the inter-annual variations. Based on results of comparison with data in other regions in the post-volcanic (since 1994) period, we note the absence of a significant trend and a small difference of AOD in three quite different regions of Russia (Moscow, Bugrino, and Tomsk). For the region of Moscow, we discuss the characteristics of the trend for a longer time period, from 1955 to 2007. It is shown that in many-year AOD variations in all considered regions, there is no direct significant relation to the cycles of the solar activity.