

Результаты двухточечных экспериментов по оценке антропогенного воздействия города на характеристики прозрачности атмосферы

С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов, И.М. Насртдинов,
С.А. Турчинович, Ю.С. Турчинович*

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

Поступила в редакцию 30.04.2009 г.

Проведен сравнительный анализ данных одновременных измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) и влагосодержания атмосферы в восточном пригороде г. Томска (Академгородок) и фоновом районе (удаление ~60 км). Рассмотрена зависимость аэрозольного замутнения в пригороде от направления переноса воздушных масс. Кроме спектральных АОТ атмосферы дополнительно рассматриваются две ее компоненты, обусловленные мелко- и грубодисперсным аэрозодем. Отмечается, что изменчивость характеристик замутнения атмосферы, в основном, обусловлена синоптическими процессами и проявляется одинаково в городском и фоновом районах. В летнее время АОТ и влагосодержание атмосферы в двух районах статистически неразличимы, что свидетельствует об отсутствии антропогенного воздействия города. В холодный период в пригородной зоне возможны более высокие замутнения атмосферы, по-видимому, из-за инверсионного накопления аэрозоля.

Наиболее высокие аэрозольные замутнения наблюдаются при ветрах из южного сектора. Мелкодисперсная компонента АОТ в холодный период в среднем на 14% больше при переносах со стороны города (с запада и северо-запада), а грубодисперсная компонента имеет небольшое превышение значений при западном переносе воздуха в сравнении с восточным.

Ключевые слова: прозрачность атмосферы, аэрозольная толщина, влагосодержание, город, фоновый район; spectral transmittance, aerosoloptical depth, columnar water vapor, town, background area.

Введение

Как известно, аэрозоль и водяной пар (наряду с облачностью) являются наиболее вариабельными компонентами атмосферы, определяющими характеристики радиационного режима. Районы крупных населенных пунктов, естественно, оказывают определенное локальное или региональное влияние на формирование аэрозольно-газового состава атмосферы и ее прозрачность. Один из подходов оценки антропогенного воздействия основывается на проведении двухточечных измерений характеристик атмосферы в городской зоне и соседнем фоновом районе (эксперименты типа «город–фон»). Интегральное воздействие по всей толще атмосферы может быть оценено по данным измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) и влагосодержания атмосферы с использованием солнечных фотометров.

Дополнительное аэрозольное замутнение атмосферы, обусловленное промышленным загрязнением,

уже рассматривалось в ряде работ на основе данных актинометрических наблюдений в городе и на ближайшей «чистой» станции [1, 2 и др.]. Анализ АОТ атмосферы, восстановленных для длины волны 0,55 мкм, показал, что превышение АОТ в городе может составлять несколько десятков процентов и более выражено в зимний период.

В настоящей статье обобщены результаты нескольких циклов двухточечных измерений АОТ и влагосодержания атмосферы в районе г. Томска. В отличие от [1, 2], здесь анализируются аэрозольное замутнение атмосферы в различных участках спектра, а также отдельные компоненты АОТ, обусловленные оптическим вкладом мелкодисперсного и грубодисперсного аэрозоля.

1. Характеристика экспериментов

Для выявления антропогенного воздействия г. Томска на замутнение атмосферы рассматриваются результаты измерений прозрачности атмосферы в двух районах («город–фон»), выполненных в 1997, 1999, 2000, 2001, 2006, 2007 и 2008 гг. Общий объем данных составил 286 совместных часовых замеров за 82 дня измерений. Сроки проведения экспериментов и количество полученных данных приведены в табл. 1.

* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Ильмир Мансурович Насртдинов; Сергей Анатольевич Турчинович; Юрий Сергеевич Турчинович.

Таблица 1

**Сроки и продолжительность
двухточечных экспериментов «город–фон»**

Год	Сроки экспериментов	Количество среднечасовых значений АОТ
1997	22.07–02.08	23
1999	22.07–23.07	10
2000	25.06–13.08	47
2001	05.03–01.04	22
2006	28.07–09.09	58
2007	04.08–17.09	99
2008	18.07–15.08	27

Учитывая особенности местного климата (начало весны с 25 марта [3]), можно считать, что большая часть результатов 2001 г. была получена в зимних условиях. Все другие эксперименты проводились в летнее время. В измерениях спектральной прозрачности атмосферы использовались многоволновые солнечные фотометры типа SP-4(6) (см., например, [4]). В отдельных случаях привлекались данные наблюдений Sun-Sky фотометра Cimel CE 318, работающего в Томске по программе AERONET ([5], <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Основной пункт, где ведутся круглогодичные измерения прозрачности атмосферы, расположен в восточном пригороде г. Томска (Академгородок). Второй пункт наблюдений – полигон «Фоновый» – находится на берегу Оби в лесной зоне, удаленной от города на 60 км в западном направлении. При таком расположении приборов, с учетом западного – юго-западного переноса воздушных масс, можно полагать, что Академгородок находится в зоне антропогенного воздействия города, а второй пункт представляет фоновый район для исследуемого региона.

При сравнении результатов в двух районах использовались среднечасовые и среднедневные значения следующих характеристик:

1) спектральные АОТ на трех длинах волн $\tau_{0,44}^a$, $\tau_{0,5}^a$, $\tau_{0,87}^a$ и влагосодержание атмосферы W ;

2) параметры α и β формулы Ангрстрема, характеризующие спектральную зависимость АОТ:

$$\tau^a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad (1)$$

где α – показатель селективности; β – коэффициент мутности;

3) грубодисперсная τ^c и мелкодисперсная $\tau_{0,5}^f$ (для длины волны 0,5 мкм) компоненты АОТ;

4) коэффициенты взаимной корреляции R и разности характеристик Δ_i в двух районах – например, $\Delta_{0,44} = \tau_{0,44}^a(\text{«город»}) - \tau_{0,44}^a(\text{«фон»})$.

Грубодисперсная компонента τ^c определялась по минимальным значениям АОТ в области спектра 1,2–4 мкм или оценивалась (в случае отсутствия данных в ИК-диапазоне) по эмпирической зависимости от параметра β (подробнее см. [6, 7]). Мелкодисперсная компонента $\tau_{0,5}^f$ рассчитывалась как остаточная аэрозольная толща для заданной длины волны: $\tau_{0,5}^f = \tau_{0,5}^a - \tau^c$.

Ниже проанализировано антропогенное влияние города для трех случаев (массивов данных):

1) на примере летнего цикла измерений 2006 г.;
2) зимне-весеннего цикла 2001 г.; 3) общего массива данных двухточечных экспериментов в летний период.

2. Летний эксперимент 2006 г.

На рис. 1 иллюстрируются результаты параллельных измерений $\tau_{0,5}^a$ и влагосодержания атмосферы в двух районах, а в табл. 2, 3 представлены статистические характеристики анализируемых данных.

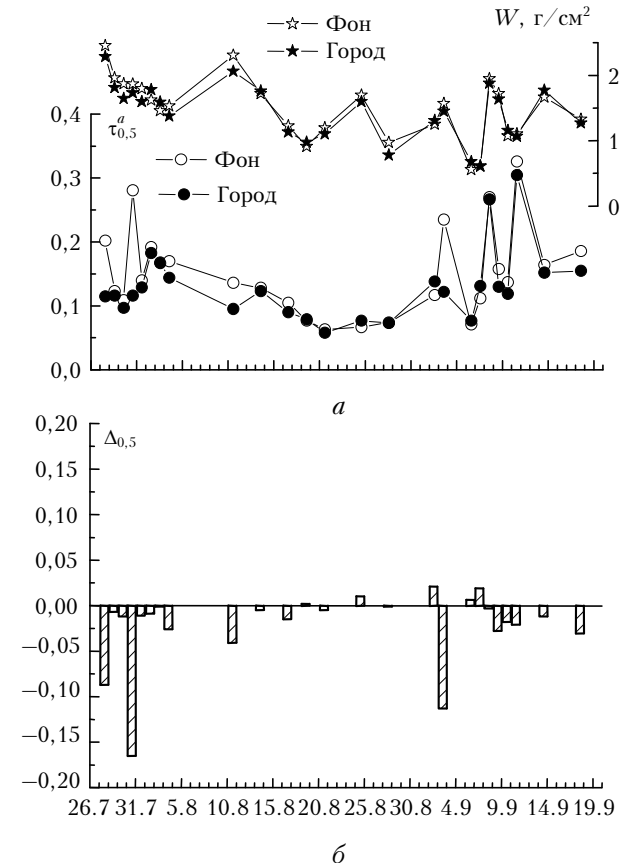


Рис. 1. Временной ход среднедневных значений $\tau_{0,5}^a$, W (а) и величины отличия $\Delta_{0,5}$ (б) в двух районах наблюдений

Из рис. 1 хорошо видно, что колебания характеристик замутнения атмосферы в фоновом и пригородном районе носят согласованный характер и обусловлены межсуточным изменением синоптических условий. Более тесная взаимосвязь наблюдается для влагосодержания атмосферы, а коэффициенты взаимной корреляции спектральных АОТ уменьшаются с ростом длины волны от 0,84 до 0,62. Средние отличия характеристик составляют малые величины и статистически не значимы, хотя для отдельных часов и дней наблюдений есть заметный разброс данных. Обращают на себя внимание более высокие значения АОТ и влагосодержания атмосферы в фоновом районе. Если для W это можно объяснить наличием рядом крупного водоема (р. Обь), то для АОТ разумного объяснения не находится.

Таблица 2

Средние (\pm СКО) значения АОТ и влагосодержания атмосферы в двух районах

Характеристика	Летний эксперимент 2006 г.		Общий массив летних экспериментов		Зимне-весенний эксперимент 2001 г.	
	«город»	«фон»	«город»	«фон»	«город»	«фон»
$\tau_{0,44}^a$	0,150 \pm 0,070	0,151 \pm 0,073	0,149 \pm 0,077 (0,147 \pm 0,047)	0,148 \pm 0,084 (0,142 \pm 0,078)	0,158 \pm 0,057	0,107 \pm 0,057
$\tau_{0,5}^a$	0,128 \pm 0,058	0,140 \pm 0,067	0,125 \pm 0,064 (0,123 \pm 0,063)	0,125 \pm 0,070 (0,121 \pm 0,065)	0,133 \pm 0,051	0,091 \pm 0,051
$\tau_{0,87}^a$	0,066 \pm 0,031	0,075 \pm 0,044	0,055 \pm 0,028 (0,054 \pm 0,028)	0,058 \pm 0,035 (0,055 \pm 0,030)	0,080 \pm 0,040	0,045 \pm 0,033
α	1,21 \pm 0,21	1,14 \pm 0,29	1,46 \pm 0,38 (1,46 \pm 0,39)	1,39 \pm 0,54 (1,41 \pm 0,51)	1,13 \pm 0,64	1,32 \pm 0,44
β	0,055 \pm 0,026	0,065 \pm 0,038	0,045 \pm 0,023 (0,044 \pm 0,022)	0,048 \pm 0,030 (0,045 \pm 0,025)	0,063 \pm 0,037	0,040 \pm 0,031
τ^c	0,045 \pm 0,022	0,053 \pm 0,032	0,037 \pm 0,019 (0,036 \pm 0,019)	0,040 \pm 0,025 (0,037 \pm 0,021)	0,044 \pm 0,039	0,031 \pm 0,019
$\tau_{0,5}^f$	0,083 \pm 0,039	0,086 \pm 0,041	0,089 \pm 0,047 (0,087 \pm 0,048)	0,085 \pm 0,051 (0,083 \pm 0,048)	0,089 \pm 0,037	0,060 \pm 0,037
W	1,34 \pm 0,43	1,38 \pm 0,47	1,74 \pm 0,57 (1,71 \pm 0,56)	1,79 \pm 0,57 (1,78 \pm 0,57)	0,45 \pm 0,37	0,45 \pm 0,36

Таблица 3

Коэффициенты корреляции и средние (\pm СКО) отклонения характеристик в двух районах

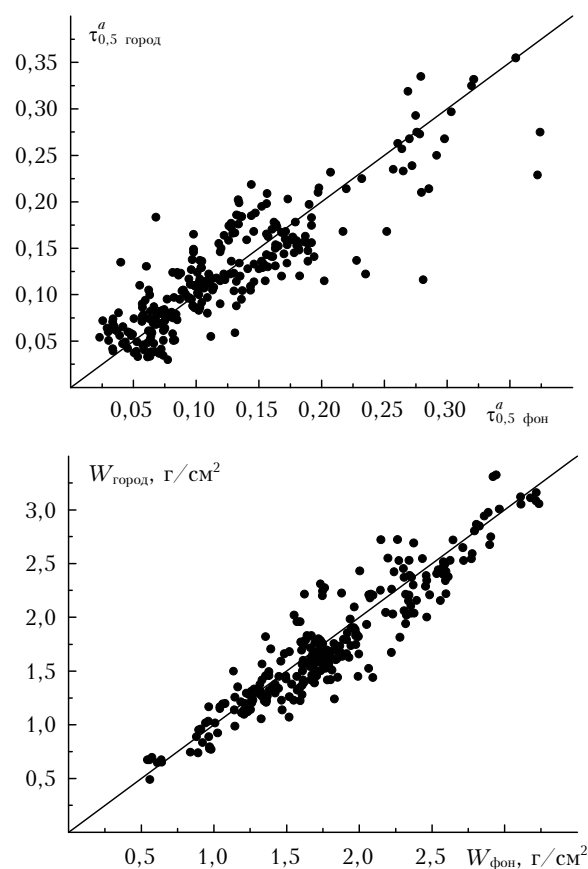
Эксперимент	$R_{0,44}$	$R_{0,5}$	$R_{0,87}$	R_W	$\Delta_{0,44}$	$\Delta_{0,5}$	$\Delta_{0,87}$	Δ_W
Лето 2006 г.	0,84	0,84	0,62	0,97	-0,0015 \pm 0,041	-0,0117 \pm 0,037	-0,0088 \pm 0,035	-0,053 \pm 0,19
Лето общее	0,87	0,87	0,79	0,93	0,0016 \pm 0,042	0,00002 \pm 0,035	-0,0026 \pm 0,022	-0,057 \pm 0,22
Зима 2001 г.	0,69	0,74	0,76	0,97	0,051 \pm 0,045	0,042 \pm 0,037	0,035 \pm 0,026	-0,005 \pm 0,09

При более детальном анализе оказалось, что основная часть данных (~80%) сосредоточена в области малых Δ_τ – до 0,05 (см. рис. 1, б). Отдельные большие выбросы значений Δ_τ (данные за 27, 30 июля и 2 сентября), искажающие итоговый результат и снижающие корреляцию, могут быть следствием: 1) влияния местных источников аэрозоля в каждом пункте; 2) несинхронности изменения замутнения в двух разнесенных районах при прохождении фронтов и смене воздушных масс; 3) остаточного влияния полупрозрачной облачности, не исключенной в том или ином районе.

Сравнение АОТ в других летних циклах изменений подтвердило, что среднее значение Δ_τ близко к нулю, но может иметь разные знаки (замутнение в городе чуть выше или ниже, чем в фоновом районе). То есть при недостаточной статистике измерений знак итоговой величины различия характеристик Δ_τ может быть обусловлен «методическими» погрешностями двухточечного эксперимента.

3. Обобщение летних экспериментов

Для получения более надежных оценок различия замутнения атмосферы в двух районах были рассчитаны характеристики для общего массива всех летних экспериментов. Сравнение результатов параллельных измерений АОТ и влагосодержания атмосферы в пригородном и фоновом районах показало наличие хорошей взаимосвязи (рис. 2). Из данных, приведенных в табл. 2, 3, видно, что средние значения всех характеристик в двух районах очень

Рис. 2. Регрессионная связь $\tau_{0,5}^a$ и W , измеренных в городском и фоновом районах в летнее время

близки — величина различия много меньше погрешности измерений и среднеквадратических отклонений, обусловленных межсуточными вариациями. Вместе с тем просматривается небольшое превышение в фоновом районе влагосодержания и грубодисперсной компоненты АОТ, а мелкодисперсная компонента $\tau_{0,5}^a$ чуть больше в пригороде Томска.

Для оценки возможного проявления «методических» погрешностей дополнительно была проведена фильтрация массива данных от выбросов с использованием стандартной процедуры — исключались замеры, отличающиеся от среднего более чем на два среднеквадратических отклонения. Результаты расчетов для очищенного массива данных «город—фон» приведены в скобках в табл. 2. Сравнение с данными для исходного массива (неочищенного от выбросов) показало, что полученные значения характеристик практически не меняются и приводят к тем же выводам. Таким образом, из результатов двухточечных экспериментов в летний период следует: 1) средние значения АОТ и влагосодержания атмосферы в двух районах статистически неразличимы, т.е. антропогенное воздействие города не проявляется; 2) колебания характеристик замутнения атмосферы, в основном, обусловлены синоптическими процессами и происходят практически одновременно в городском и фоновом районах.

4. Зимне-весенний эксперимент 2001 г.

В отличие от летнего периода все характеристики АОТ атмосферы во время эксперимента 2001 г. значительно различаются: в пригороде наблюдались более высокие значения τ_λ^a во всем диапазоне спектра (см. табл. 2 и рис. 3). Кроме того, в двух районах разный характер спектральной зависимости АОТ (рис. 3, в). Величина превышения АОТ составляет от 20% в средней части спектрального диапазона до 60–90% на краях. Указанные отклонения от регионального фона наблюдались в основном в середине дня в период с 12 по 18 марта (рис. 3, а).

Повышенные значения аэрозольного замутнения могли быть обусловлены измерениями прозрачности атмосферы через «шапку» индустриального загрязнения над городом. Однако при сравнении средних значений АОТ до и после полудня (трасса наблюдений проходит вне города и над городом) не было выявлено отличия характеристик. Следовательно, «шапка» загрязнения (аэрозоль в подынверсионном слое) если и была, то простиралась на расстояние, которое гораздо больше размеров города. Кроме того, была рассмотрена зависимость АОТ от направления ветра, показавшая отсутствие выносов антропогенного аэрозоля со стороны города в период экспериментов. (Повышенные значения Δ_τ наблюдались при ветрах из южного и восточного секторов, а не со стороны города.)

Малочисленность данных, полученных в зимне-весенний период, не позволяет делать определенных выводов и требует дополнительных исследований.

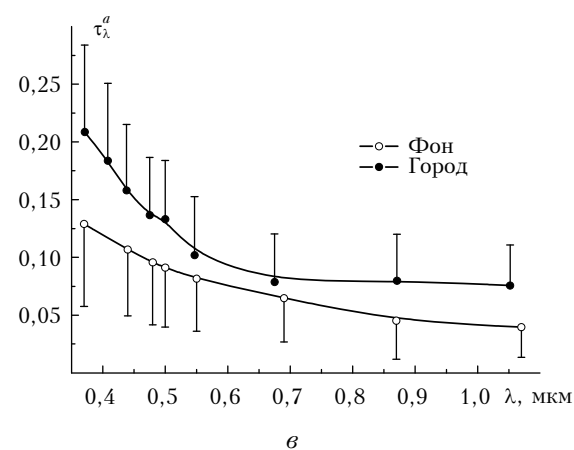
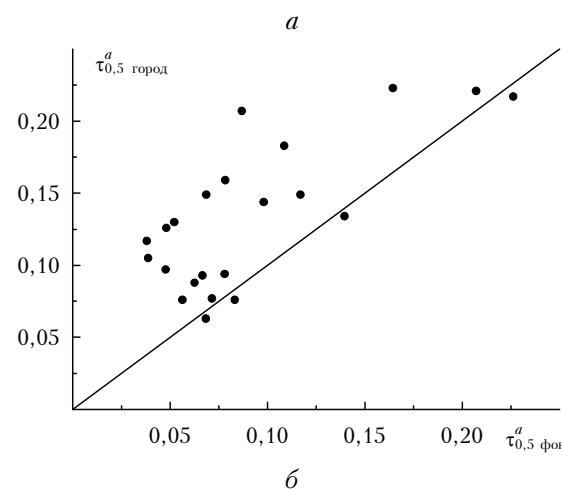
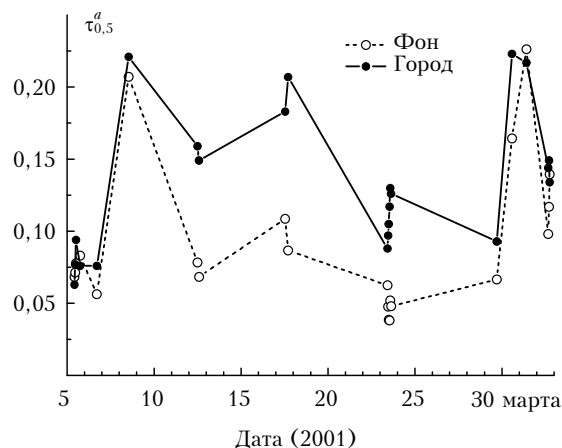


Рис. 3. Временной ход АОТ (а), регрессионная связь $\tau_{0,5}^a$ (б) и средние спектральные зависимости АОТ (в) в двух районах во время зимне-весеннего эксперимента 2001 г.

Предварительно можно предположить следующие причины более высоких замутнений атмосферы в пригородной зоне, наблюдавшихся в середине марта:

- накопление городского аэрозоля в инверсионном слое достаточно протяженном, но не охватывающем фоновый пункт наблюдений;
- переносы через Томск замутненного воздуха из соседних южных регионов, которые проходили вне фонового пункта наблюдений;

– более ранний сход снежного покрова в городской зоне и генерация аэрозоля с поверхности.

Заметим, что проводившиеся параллельно измерения коэффициентов рассеяния аэрозоля и массовой концентрации сажи в приземном слое [8] показали повышенные значения в пригороде ночью, но отсутствие разницы «город–фон» в дневное время. Такое поведение можно объяснить ночным накоплением аэрозоля в приземном слое и дневным подъемом «шапки» загрязнения в более высокие слои атмосферы (или разрушением температурной инверсии). При такой интерпретации результаты измерений характеристик аэрозоля в приземном слое и во всей толще атмосферы согласуются.

5. Влияние направления ветра

Для оценки антропогенного влияния города был проанализирован еще один вопрос – насколько сказывается перенос воздуха (направление ветра) со стороны города на результаты измерений АОТ атмосферы в восточном пригороде Томска. Следует сделать несколько уточнений:

1) в данном случае рассматривались не результаты двухточечных экспериментов «город–фон», а общий массив данных измерений АОТ в пригороде Томска (1995–2007 гг.; число среднечасовых значений: летом – 3525, зимой – 825);

2) городская зона находится в северо-западном секторе $\sim 200\text{--}360^\circ$ относительно пункта наблюдений;

3) использованные нами данные о характеристиках ветра на одной высоте приземного слоя не дают полной информации о реальных переносах воздуха и могут приводить к искажению оценок антропогенного влияния города и соседних регионов.

На рис. 4, а приведена зависимость средних значений $\tau_{0,5}^a$ от направления ветра (при скоростях более 1 м/с) за общий период наблюдений.

Жирными линиями выделены секторы переносов, в пределах которых есть статистически значимые различия АОТ с доверительной вероятностью не менее 0,99. Наиболее высокие значения АОТ характерны для ветров из южного сектора, средний уровень – для западного переноса (со стороны города) и минимальные значения при северо-восточных направлениях ветра. В этом заключается основная особенность для исследуемого региона – наиболее замутненные воздушные массы приходят с юга.

Учитывая, что для мелко- и грубодисперсной компонент АОТ и для разных сезонов могут быть разные зависимости от направления переносов, рассмотрим этот вопрос подробнее. Распределение $\tau_{0,5}^f$ и τ^c для разных направлений ветра в теплый (июнь–сентябрь) и холодный (ноябрь–март) периоды показано на рис. 4, б, в. Из приведенных данных следует, что для грубодисперсной компоненты общими особенностями для зимы и лета являются:

– минимальные значения τ^c при ветрах из северо-западного сектора – наиболее чистого от потенциальных источников аэрозоля;

– немного большие замутнения при переносах воздуха со стороны города (на 5% зимой и $\sim 13\%$ летом);

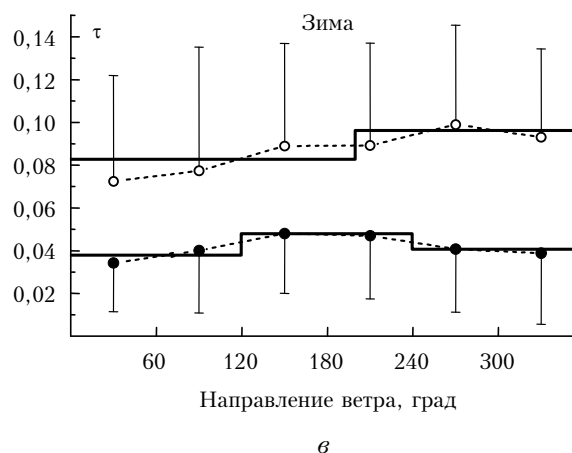
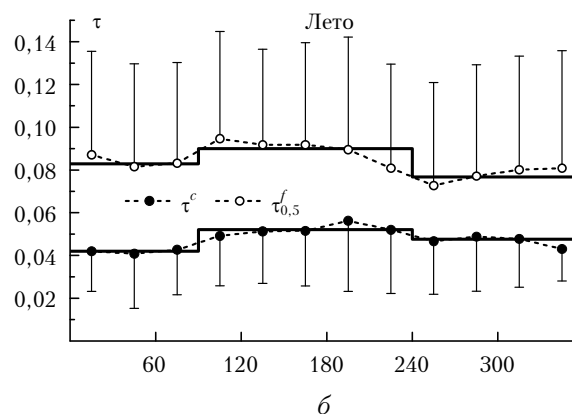
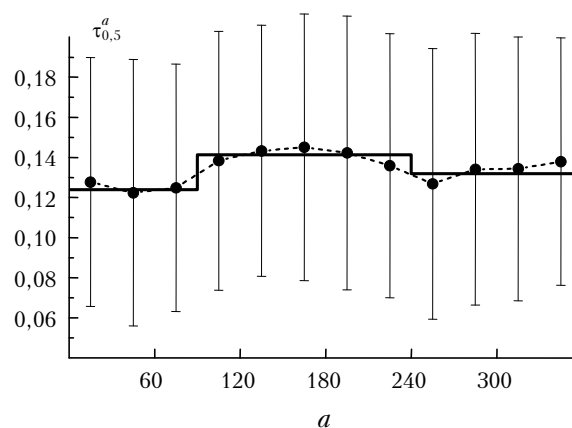


Рис. 4. Зависимости от направления ветра характеристик АОТ в пригороде Томска: средние $\tau_{0,5}^a$ за общий период наблюдений (а), $\tau_{0,5}^f$ и τ^c в теплый (б) и холодный (в) периоды

– максимальные значения τ^c при ветрах из южного сектора.

По мелкодисперсной компоненте пространственные отличия аэрозольного замутнения имеют несколько иной характер. В холодный период наиболее высокие значения $\tau_{0,5}^f$ (более 14%) наблюдаются при переносах со стороны города (т.е. действительно возможно антропогенное влияние). Летом максимальные значения $\tau_{0,5}^f$ (как и для τ^c) характерны для ветров из южного сектора, а минимальные –

при выносах со стороны города. Последний факт можно объяснить, конечно, не очищающим влиянием города, а преобладающим приходом из этого направления более чистых воздушных масс по сравнению с переносом из южного и восточного секторов.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Основная изменчивость АОТ и влагосодержания атмосферы обусловлена сменой синоптических условий и происходит согласованно в фоновом и пригородном пунктах наблюдений. Коэффициенты взаимной корреляции характеристик замутнения атмосферы в двух районах составляют 70–97% (более тесная взаимосвязь наблюдается для влагосодержания).

2. Летом характеристики АОТ и влагосодержание атмосферы в фоновом и восточном пригороде Томска (Академгородок) статистически не различимы, что свидетельствует об отсутствии антропогенного воздействия города. В холодный период в пригороде могут наблюдаться более высокие замутнения атмосферы, чем в фоновом районе, что, по видимому, обусловлено накоплением аэрозоля под протяженным инверсионным слоем, охватывающим восточный пригород.

3. Зависимость аэрозольного замутнения от направления ветра характеризуется следующими основными особенностями: а) наиболее высокие значения АОТ наблюдаются при ветрах из южного сектора ($-120-240^\circ$); б) мелкодисперсная компонента $\tau_{0,5}$ в холодный период в среднем на 14% больше при переносах со стороны города, а летом, наоборот, имеет минимальные значения; в) по грубодисперсной компоненте АОТ наблюдается небольшое пре-

вышение значений (на 0,002–0,006) при западном переносе воздуха в сравнении с восточным.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 75, проекта № 16.1 ПФИП РАН и гранта РФФИ № 09-05-00961.

1. Горбаренко Е.В. Аэрозольная составляющая оптической толщины атмосферы как характеристика антропогенного загрязнения воздуха над промышленными центрами // *Метеорол. и гидрол.* 1997. № 3. С. 12–18.
2. Ярхо Е.В. Временная изменчивость аэрозольной оптической толщины атмосферы в различных климатических регионах // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 1994. Т. 30. № 3. С. 417–424.
3. *Климат Томска* / Под ред. С.Д. Кашиńskiego, Л.И. Трифоновой, П.А. Швер. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 176 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. О взаимосвязях параметров формулы Ангрстрема и аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 1–4 мкм // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20. № 3. С. 222–228.
8. Панченко М.В., Козлов В.С., Терпугова С.А., Польшкин В.В., Яушева Е.П. Об изменчивости содержания аэрозоля, сажи и параметра конденсационной активности частиц в городских и фоновых условиях в весенний период года // *Аэрозоли Сибири. VIII Рабочая группа: Тезисы докл. Томск: Изд-е ИОА СО РАН, 2001. С. 18–19.*

S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, I.M. Nasrtdinov, S.A. Turchinovich, Yu.S. Turchinovich. Results of two-point experiments on estimating the anthropogenic urban effect on characteristics of atmospheric transparency.

To estimate the anthropogenic effect of Tomsk on the results of measurements of aerosol optical depth (AOD) and moisture content of the atmosphere in the east suburb (Akademgorodok), we discussed two issues: 1) comparative analysis of data of simultaneous measurements in suburban zone and in background region (~60-km separation); and 2) dependence of aerosol turbidity in suburb on the direction of air mass transport. In addition to spectral atmospheric AODs, we also considered two AOD components, caused by the finely and coarsely dispersed aerosol. It is noted that the variations of atmospheric turbidity characteristics are mainly caused by synoptic-scale processes and are manifested themselves similarly in urban and background regions. At summertime, AOD and moisture content of the atmosphere in the two regions are statistically indistinguishable, indicating the absence of anthropogenic urban influence. In cold period, the suburban zone may be characterized by higher atmospheric turbidity, seemingly because of inversion accumulation of aerosol.

The dependence of AOD on wind direction has the following features: 1) overall, the largest aerosol turbidities are observed during winds from the south sector; 2) in the cold period, the finely dispersed AOD component is, on the average, by 14% larger in the cases of transport from direction of the city (from west and north-west); and 3) the coarsely AOD component is a little larger during westward air transport than during eastward one.