

**ЛОКАЛЬНЫЕ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ,
ОПРЕДЕЛИВШИЕ ИЗМЕНЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОЙ
ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ АТМОСФЕРЫ В МОСКВЕ
В 1955—2018 ГОДАХ**

Е. В. Горбаренко

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии;
Ленинские горы, ГСП-1, 119991 Москва, Россия,
e-mail: catgor@mail.ru

Поступила в редакцию 13.11.2019
Поступила после доработки 2.12.2019

Введение

Одной из задач климатических исследований является оценка и учет пространственно-временных особенностей аэрозольных свойств атмосферы. В настоящее время эта проблема решается путем совместного анализа спутниковой информации и данных наземного аэрозольного мониторинга, осуществляемого по программе AERONET. Восстановить ряды наблюдений за оптическими свойствами аэрозоля за длительный период времени на больших территориях возможно по данным наблюдений актинометрической сети станций. По результатам обработки таких рядов опубликован ряд статей, в которых оценены основные факторы, определяющие аэрозольную мутность атмосферы в различных регионах, и проанализированы ее пространственно-временные изменения. К концу XX столетия многими авторами был сделан вывод об отсутствии влияния вулканического аэрозоля и уменьшении антропогенного влияния на прозрачность атмосферы (Горбаренко

и др., 2006; Махоткина и др., 2014, 2015; Русина и др., 2016; Сакерин и др., 2014; Holben et al., 2001; Ohvriil H et al, 2009). В XXI веке тенденция уменьшения аэрозольной мутности сохранилась, а в настоящее время усилилась.

Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей изменения аэрозольной мутности атмосферы в Москве в последние десятилетия в сравнении со всем периодом наблюдения и оценка возможных причин, определивших ее уменьшение в этот период.

Методика и данные

С 1955 г. в Метеорологической обсерватории Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МО МГУ) ведутся наблюдения за прямой солнечной радиацией, на основе которых рассчитываются интегральные характеристики прозрачности атмосферы (Евневич, Савиковский 1989). Разработанный Т. В. Евневич метод определения влагосодержания атмосферы по наземным наблюдениям за упругостью водяного пара позволил оценить аэрозольную и влажную составляющие интегрального коэффициента прозрачности атмосферы (Евневич, 1967). Большая работа по обобщению и анализу данных по интегральной прозрачности атмосферы была проделана Галиной Михайловной Абакумовой.

В качестве характеристики аэрозольной мутности атмосферы в МО МГУ используется аэрозольная оптическая толщина атмосферы (АОТ) для эффективной длины волны солнечного спектра 550 нм, рассчитанная по данным об интегральной прямой солнечной радиации, измеренной стандартным актинометром с учетом параметра Ангстрема (n). Методика для определения АОТ была разработана в 1990 году сотрудниками МО МГУ и Института физики атмосферы (Тарасова, Ярхо, 1991). Для мониторинга аэрозольной мутности атмосферы в МО МГУ расчеты АОТ (τ_{a,λ_0}) проводятся по формуле (1), полученной для $n = 1$:

$$\tau_{a,\lambda_0} = \frac{\ln S - \left(0,189 \cdot W^{-0,183} + \left(0,880 \cdot W^{-0,009} - 1\right) / \sin h_o\right)}{0,813 \times W^{-0,002} - 1 + \left(0,435 \cdot W^{-0,0321} - 1\right) / \sin h_o} \quad (1)$$

в которой S — прямая солнечная радиация, приведённая к среднему расстоянию между Землей и Солнцем (на середину часа, в течение которого диск солнца в 5-градусной зоне не был закрыт облаками), h — высота солнца на середину соответствующего часа, W — влагосодержание атмосферы, получаемое по методике Т. В Евневич (1967) для $h > 10^\circ$.

При разработке этой методики рассматривался диапазон значений АОТ от нуля до единицы. При значениях АОТ больше единицы ошибка ее определения возрастает за счет выхода реальных значений АОТ за заложенное в модели верхнее предельное значение. Кроме того, определение АОТ по данным стандартных наблюдений сопровождается рядом погрешностей, связанных с измерением прямой радиации актинометром, наибольшие ошибки наблюдаются при АОТ $> 0,5$. Для компенсации этих погрешностей при обработке измерений в сильно замутненной атмосфере в работе (Горбаренко, Рублев, 2016) была предложена специальная коррекционная формула:

$$\tau_{a,\lambda_0}^c = \tau_{a,\lambda_0} \cdot \left(0,9 + \frac{\tau_{a,\lambda_0}^{\frac{0,7}{0,75 \cdot \sinh o + 0,125}}}{5} \right) \quad (2)$$

Формула (2) позволяет получать исправленные значения τ_{a,λ_0}^c на основе τ_{a,λ_0} , рассчитанных по формуле (1).

Применение коррекции для АОТ $> 0,5$ практически полностью исключает вышеописанные погрешности в определении аэрозольной оптической толщины атмосферы. Для всех срочных значений АОТ $> 0,5$, полученных в МО МГУ по актинометрическим измерениям за период с 1955 по 2018 гг. такая коррекция была выполнена. При этом значительное увеличение аэрозольной мутности

атмосферы было выявлено в экстремальных ситуациях. К ним относятся замутнение атмосферы после значительных вулканических извержений, дымная мгла от лесных пожаров, накопление аэрозоля в атмосфере при неблагоприятных метеорологических условиях (инверсии, штиль и т. п.), продолжающихся в течение нескольких дней. В Москве за весь рассматриваемый период число таких случаев составило не более 10 % от общего количества. После ввода соответствующих поправок средние месячные и годовые значения АОТ изменились только в месяцы с устойчивой дымной мглой в 1972, 2002 и 2010 годах. Подробное рассмотрение метода расчета АОТ, анализ ее изменчивости под влиянием естественных и антропогенных факторов приведены в работах (Абакумова, Горбаренко, 2008; Горбаренко, 2003; Горбаренко и др., 2006).

Анализ результатов

Многолетние изменения АОТ

С учетом произведенной коррекции пределы изменчивости АОТ лежат в пределах:

- для суточных значений АОТ от 0,01 до 3,29,
- для средних месячных от 0,01 до 1,43,
- для средних годовых от 0,10 до 0,35.

Максимальные суточные и месячные значения отмечены в августе 2010 года в период дымной мглы от лесных пожаров, максимальные годовые значения — в периоды проявления последствий извержения вулканов Эль-Чичон и Пинатубо.

Начальный этап работы МО МГУ совпал по времени с годами активной вулканической деятельности, что определило практически постоянное присутствие в атмосфере вулканического аэрозоля (табл. 1, рис. 1).

Конец XX столетия ознаменовался двумя самыми мощными взрывными извержениями вулканов: Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991), оказавшими глобальное влияние на загрязнение атмосферы.

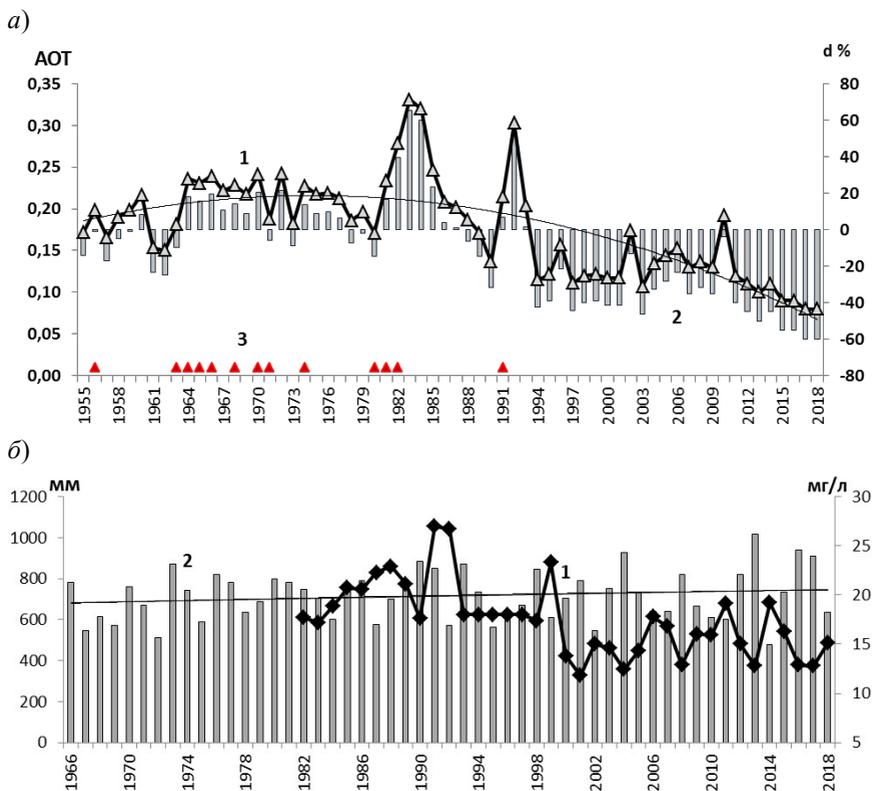


Рис. 1. Многолетние изменения средних годовых значений:
 а) — АОТ (1) и отклонений средних годовых значений АОТ, %, (2)
 от нормы за 1961—1990 гг. (2), год извержения вулканов (3),
 б) — общей минерализации осадков (1) и количества осадков (2).
 Красными треугольниками отмечены годы извержения вулканов.

Таблица 1

Аэрозольная оптическая толщина в Москве в период влияния различных факторов

| Период | Факторы, влияющие на состояние атмосферы (извержения вулканов, пожары) | Дата события | Высота выброса, км | Масса вещества, Мт | АОТ _{ср.} | АОТ _{макс.} | Число случаев |
|-----------|--|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------|
| 1955—1962 | Безымянная (п-ов Камчатка) | 30.03.1956 | 35 | 0,5—1 | 0,20 | 0,62 | 896 |
| | Агунг (Индонезия) | 17.03.1963 | 31 | 10—30 | | | |
| | Шивелуч (п-ов. Камчатка) | 12.11.1964 | 15 | 1 | | | |
| 1963—1968 | Таал (Филиппины) | 28.09.1965 | 20 | 1 | 0,23 | 0,80 | 637 |
| | Аву (Индонезия) | 12.08.1966 | 18 | 2 | | | |
| | Фернандина (Галапагосские о-ва) | 11.06.1968 | 24 | 2 | | | |
| | Гекла (Исландия) | 05.05.1970 | 15 | 1 | | | |
| 1969—1973 | Суфриер (о-ва Сент-Винсент) | 17.10.1971 | 18 | 2 | 0,24 | 2,45 | 651 |
| | Лесные и торфяные пожары (ЕТС) | 08.1972 | | | | | |
| 1974—1976 | Фуэго (Гватемала) | 17.10.1974 | 20 | 1,5—3,0 | 0,2 | 0,83 | 352 |

Продолжение таблицы 1

| Период | Факторы, влияющие на состояние атмосферы (извержения вулканов, пожары) | Дата события | Высота выброса, км | Масса вещества, Мт | АОТ _{ср.} | АОТ _{макс.} | Число случаев |
|-----------|--|----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------|
| 1980—1983 | Сент-Хеленс (США) | 18.05.1980 | 25 | 0,5—1 | 0,29 | 0,91 | 324 |
| | Алаид (Курилы) | 27.04.1981 | 18 | 0,5—1 | | | |
| | Эль-Чичон (Мексика) | 4.04.1982 | 25 | 23 | | | |
| 1991—1993 | Пинатубо (Филиппины) | 5.06.1991 12—16.06.1991 | 20—28 | | 0,28 | 0,82 | 210 |
| 1977—1979 | <i>Период очищения атмосферы</i> | | | | 0,23 | 0,64 | 252 |
| 1984—1987 | <i>Период очищения атмосферы</i> | | | | 0,28 | 0,78 | 345 |
| 1988—1990 | <i>Период очищения атмосферы</i> | | | | 0,20 | 0,83 | 209 |
| 1994—2001 | <i>Период очищения атмосферы</i> | | | | 0,14 | 0,61 | 713 |
| 2002—2010 | Лесные и торфяные пожары (ЕТР) | 07—09.2002 07—08.2010 | | | 0,18 | 3,29 | 828 |
| 2011—2018 | Лесные пожары (Сибирь) | 07.2016 | | | 0,11 | 0,71 | 761 |

После их извержения отмечено самое значительное увеличение АОТ (на 35—40%), а условия низкой прозрачности атмосферы сохранялись в течение двух лет после извержений (рис. 2а). В дальнейшем извержения вулканов приводили к увеличению АОТ только в региональных масштабах.

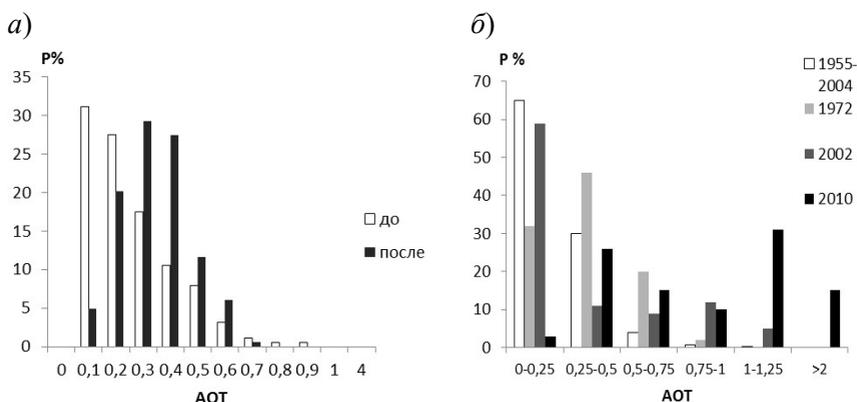


Рис. 2. Повторяемость различных градаций средних суточных значений АОТ:
 а) до и после извержений вулкана Пинатубо,
 б) в период дымной мглы от лесных пожаров в сравнении с соответствующим относительно «чистым периодом».

Антропогенная составляющая в многолетних изменениях АОТ на протяжении 64 лет наблюдений менялась. По данным наблюдений с 1955 до 1987 года во все сезоны, кроме зимы, наблюдалась тенденция увеличения аэрозольной мутности атмосферы и разности (до 30 %) между средними годовыми значениями АОТ в Москве и пригороде (Абакумова и др., 1983; Абакумова, Горбаренко, 2008). В конце 1980-х начале 1990-х годов произошло существенное сокращение промышленных предприятий, как в самой Москве, так и в целом по России. В этот же период завершился переход теплоснабжения Москвы с угля на природный газ, что привело и к уменьшению содержания сульфатов в атмосферных осадках

(Справочник, 2005). С 1994 года после полного очищения атмосферы от вулканического аэрозоля и уменьшения промышленной нагрузки началось стабильное повышение прозрачности атмосферы в Москве.

На протяжении всего периода наблюдений отмечены и локальные колебания АОТ, связанные с неблагоприятными метеорологическими условиями, способствующими накоплению примесей, и лесными пожарами в Подмосковье и Центральной России в 1972, 2002, 2010 гг. (рис. 26). Под влиянием метеорологических условий (инверсия, осадки, дневной ход конвекции и метеорологических параметров, адвекция воздуха) значение АОТ в течение дня может изменяться в 2—3 раза. На многолетнюю тенденцию изменения АОТ метеорологические факторы существенно не влияют. Вымывающее действие осадков велико, но наблюдаемая тенденция роста количества осадков незначима (рис. 16).

Особенности изменчивости АОТ в XXI веке

Повышение АОТ до максимальных значений во время лесных пожаров 2002 и 2010 годов и влияние лесных пожаров Сибири в июле 2016 года не изменили общей тенденции снижения аэрозольной мутности в Москве. Повышение АОТ, обусловленное дымной мглой от лесных пожаров, носит кратковременный характер: дымовой аэрозоль быстро вымывается из атмосферы. Задымление атмосферы Европейской территории России летом 2016 года продуктами лесных пожаров Сибири, вызванное аномальным переносом продуктов горения с востока на запад (Ситнов и др., 2017), привело к увеличению значений АОТ 25 и 26 июля до 0,58 и 0,53 соответственно. Июль 2016 года был дождливым, количество осадков составило 137 мм при норме — 91 мм, поэтому уже в августе АОТ приблизилась к минимальному значению, а сентябрьское значение 2016 года повторило минимум за весь период наблюдения.

Тенденция уменьшения АОТ наблюдается в течение всего года, но только в июле, августе и сентябре, когда существенно влияние дымной мглы, она незначима (рис. 4). Годовая амплитуда АОТ также уменьшилась (табл. 2, рис. 3).

Таблица 2

Статистические характеристики средних месячных значений АОТ

| Параметр | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Год |
|----------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|
| <i>1955-2018</i> | | | | | | | | | | | | | |
| АОТ _{ср.} | 0,13 | 0,15 | 0,19 | 0,24 | 0,22 | 0,20 | 0,21 | 0,22 | 0,19 | 0,13 | 0,11 | 0,12 | 0,18 |
| σ | 0,11 | 0,08 | 0,09 | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,11 | 0,10 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,05 |
| V% | 18 | 82 | 124 | 136 | 147 | 142 | 216 | 101 | 87 | 78 | 44 | 25 | 224 |
| АОТ _{макс.} | 0,47 | 0,44 | 0,44 | 0,54 | 0,51 | 0,39 | 0,35 | 0,9 | 0,64 | 0,38 | 0,34 | 0,44 | 0,33 |
| Год | 1968 | 1985 | 1992 | 1983 | 1983 | 1981 | 1972 | 2010 | 2002 | 1984 | 1965 | 1966 | 1983 |
| АОТ _{мин.} | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,08 |
| Год | 2009, 2018 | 1989 | 2018 | 2017 | 2017 | 2017 | 2017 | 2015 | 2003 | 2013 | 2003 | *) | 2017, 2018 |
| <i>1961-1990</i> | | | | | | | | | | | | | |
| АОТ _{ср.} | 0,18 | 0,2 | 0,22 | 0,28 | 0,28 | 0,24 | 0,25 | 0,26 | 0,23 | 0,16 | 0,14 | 0,18 | 0,24 |
| <i>1981-2010</i> | | | | | | | | | | | | | |
| АОТ _{ср.} | 0,10 | 0,14 | 0,18 | 0,26 | 0,22 | 0,20 | 0,21 | 0,24 | 0,20 | 0,14 | 0,11 | 0,07 | 0,18 |

Примечание: *) АОТ_{мин.} = 0,01 в период 1955-2018 гг. наблюдалось более трех раз.

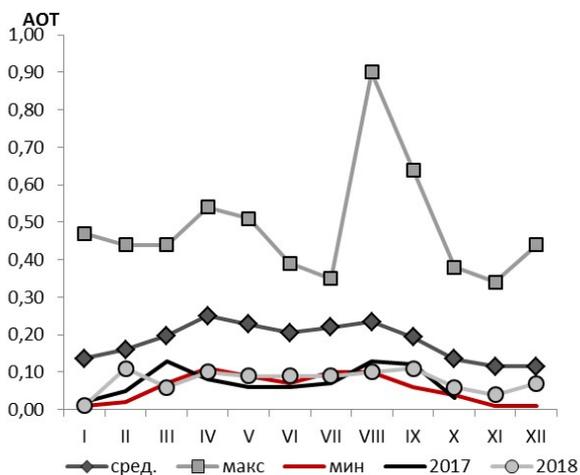


Рис. 3. Годовой ход АОТ.

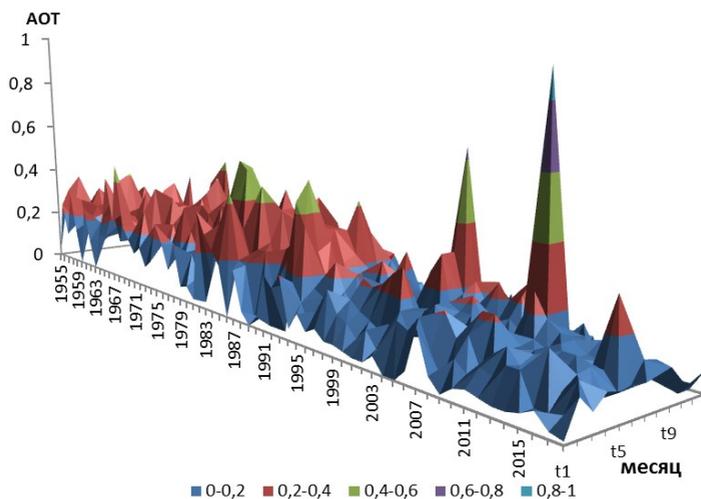


Рис. 4. Многолетние изменения средних месячных значений АОТ.

Можно сказать, что в XXI в. эта тенденция усилилась. При линейной аппроксимации годовых значений АОТ коэффициент $a=10$ с достоверностью $P = 0,99$ в период 1955—2018 гг. равнялся $-0,02$, а в период 2000—2018 гг. составил $-0,03$. В рядах месячных значений минимальные АОТ приходятся на последние десятилетия.

Средние годовые значения в XXI веке на 20—60 % ниже исторической (1961—1990) и текущей (1981—2010) норм, значения АОТ в 2017 и 2018 годах (0,08) стали абсолютными годовыми минимумами за весь период наблюдений. Аналогичный результат получен также по данным фотометра CIMEL сети AERONET, установленного в МО МГУ в 2002 году (Жданова и др., 2019).

В настоящее время в Москве ведется интенсивное строительство, захватившее обширные территории города, увеличивается парк личного автотранспорта, а аэрозольная мутность атмосферы над Москвой меньше, чем в пригородах в конце восьмидесятых годов прошлого века (рис. 5).

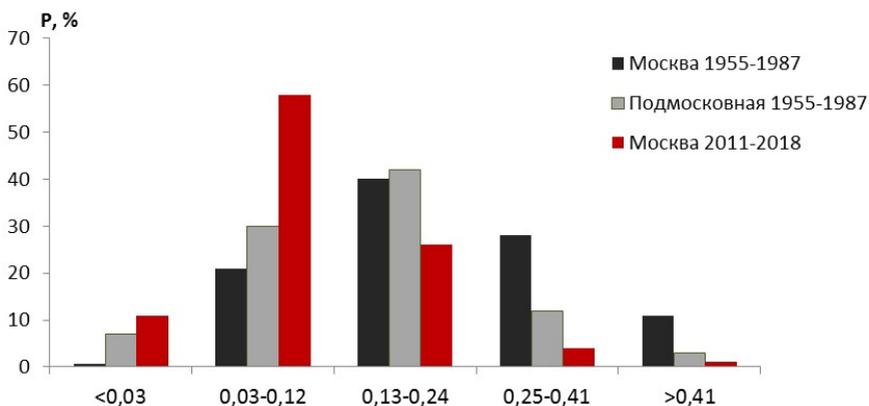


Рис. 5. Повторяемость различных градаций средних суточных значений АОТ в Москве и пригороде в различные периоды.

Влияние города на аэрозольное загрязнение атмосферы в Москве в большей степени прослеживается при ветрах с восточной составляющей. В последние годы доля антропогенного аэрозоля,

поступающего из промышленных районов Москвы, существенно уменьшилась (рис. 6). Об уменьшении содержания аэрозоля над Москвой свидетельствует и уменьшение общей минерализации осадков (рис. 16) (Еремина и др., 2014).

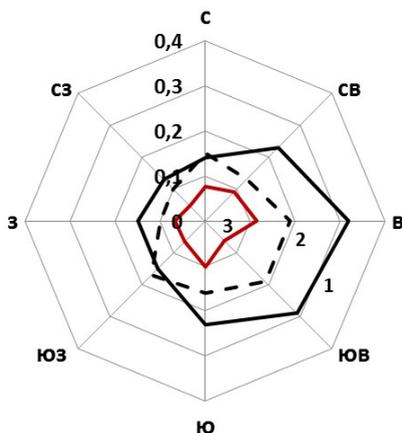


Рис. 6. Средние суточные значения АОТ при различных направлениях ветра для трех периодов: 1 – 1985 — 1993; 2 – 1994—2001; 3 – 2018 г.

Снижению уровня загрязнения и улучшению качества воздуха мегаполиса способствует реализация государственных программ и природоохранных мероприятий. Правительством Москвы реализуются комплекс мер по модернизации оборудования теплоэнергетики, обновлению автопарка столицы, усилены требования к экологическим характеристикам автомобильного транспорта. По сравнению с 2010 г. доля автотранспортных средств, соответствующих стандарту экологического класса Евро-4 и выше, увеличилась в два раза. Проведена реконструкция и строительство очистных сооружений. За последние годы суммарные выбросы загрязняющих веществ сократились на 160 тыс. т. Выбросы парниковых газов с 2013 г. уменьшились на 18 % (http://www.ecology.moscow/eco/ru/report_result). По данным ГПБУ «Мосэкомониторинг» наблюдается отрицательная динамика основных

загрязняющих воздушную среду Москвы веществ (<http://www.mosecom.ru>).

Существенное влияние на режим аэрозольной мутности оказывает поступление в атмосферу аэрозоля естественного происхождения. Внутригодовую изменчивость естественного аэрозоля отражает годовой ход АОТ, полученный по средним многолетним значениям. Для Москвы характерен годовой ход АОТ с весенним и летним максимумами. Начиная с 2011 года, годовой ход АОТ не имеет ярко выраженного характера. Годовая амплитуда уменьшилась более чем в 2 раза по сравнению со средними значениями (рис. 3). Увеличение аэрозольной мутности атмосферы в весенние месяцы (март, апрель) связано с поступлением в атмосферу естественного аэрозоля после полного схода снежного покрова. В настоящее время в Москве наблюдается сокращение периода залегания снежного покрова, что связано с его более поздним установлением и более ранним сходом (рис. 7). В XXI в. ноябрь стал в Москве бесснежным месяцем, но при этом увеличение содержания в атмосфере естественного аэрозоля в этот период не происходит.

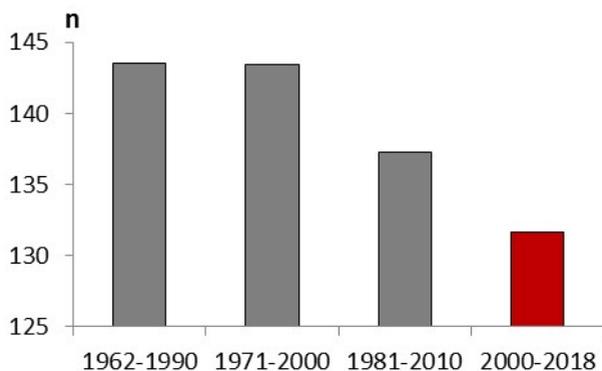


Рис. 7. Число дней со снежным покровом (n) в разные периоды.

Важным фактором сезонной изменчивости АОТ является адвекция воздушных масс с различными аэрозольными характеристиками. Летний максимум АОТ в Москве связан с повышением содержания

аэрозоля при высокой повторяемости слабых ветров, преобладании юго-восточного направления ведущего потока, в котором происходит адвекция воздуха из Средней Азии и Казахстана, богатого естественными аэрозольными частицами в условиях западной и северной периферии антициклона. Наименьшие значения АОТ в Москве наблюдаются на восточной и южной периферии антициклона, передней и тыловой части циклонов, центральной части антициклонов, в условиях гребня, что связано с адвекцией холодного и чистого воздуха из Арктики.

Современные изменения климата во многом связывают с вариациями крупномасштабной циркуляции атмосферы (Конова, 2015; Попова и др, 2018; Hurrell et al., 2003). Смена ее режимов на протяжении XX и XXI веков повлияла на смену фаз современного потепления. Выявленные зависимости между значениями АОТ и синоптическими условиями позволяют предположить, что это влияние сказалось на особенностях режима и тенденциях изменчивости АОТ.

Оценка влияния общей циркуляции атмосферы Северного полушария на АОТ

Снижение аэрозольной мутности зафиксировано на большинстве станций сети АЭРОНЕТ и на всех станциях АЭРОНЕТ, расположенных в Европе (Li et al., 2014). При отсутствии вулканического аэрозоля единообразие в тенденциях изменения АОТ в Европе свидетельствует о существенной роли глобальных процессов, связанных с изменениями общей циркуляции атмосферы Северного полушария. Для оценки этого влияния рассмотрены особенности межгодовой изменчивости АОТ во взаимосвязи с межгодовой изменчивостью индексов, характеризующих изменчивость атмосферы в Северном полушарии STANDARDIZED NORTHERN HEMISPHERE TELECONNECTION INDICES, таких как: Североатлантический (NAO), Полярно-Евразийский (POL), Скандинавский (SCA), Восточно-Атлантический (EA), Восточно-Атлантический – Западно-Российский (EAWR) (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>).

Коэффициенты корреляции между средними месячными значениями АОТ и индексами циркуляции рассчитаны для следующих периодов:

1955—1994 гг.— период влияния вулканических извержений;

1995—2018 гг.— «поствулканический период» (табл. 3, рис. 8).

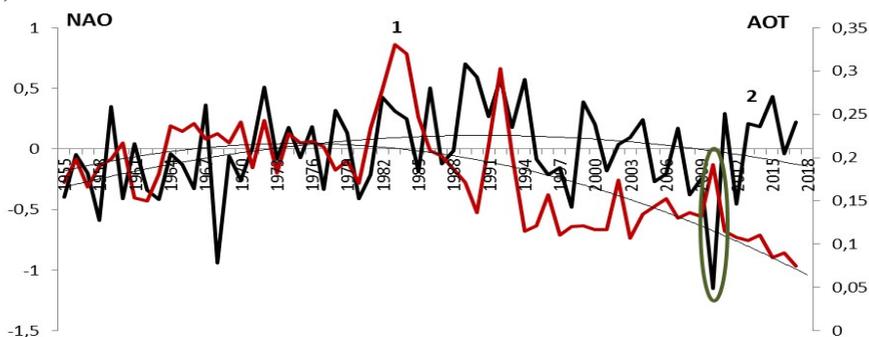
Таблица 3.

Коэффициенты корреляции между средними месячными значениями АОТ и основными индексами циркуляции

| Индекс | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Период 1955—1994</i> | | | | | | | | | | | | |
| NAO | -0,06 | -0,28 | -0,01 | 0,16 | 0,07 | -0,08 | 0,04 | 0,09 | -0,04 | -0,22 | -0,30 | -0,12 |
| EA | -0,23 | -0,30 | -0,10 | 0,09 | 0,20 | -0,10 | -0,13 | 0,15 | 0,14 | 0,14 | 0,25 | -0,25 |
| WP | -0,16 | -0,04 | 0,19 | -0,01 | -0,24 | -0,45 | -0,04 | 0,03 | -0,12 | -0,33 | 0,03 | -0,13 |
| EP/NP | -0,20 | -0,50 | 0,14 | -0,16 | 0,08 | -0,19 | -0,10 | 0,12 | -0,13 | 0,11 | 0,15 | 0,00 |
| PNA | -0,09 | 0,04 | -0,04 | 0,15 | 0,16 | 0,23 | 0,26 | 0,04 | -0,02 | -0,06 | 0,14 | 0,12 |
| EA/WR | 0,12 | -0,10 | -0,09 | -0,21 | -0,27 | -0,23 | -0,24 | 0,05 | -0,30 | -0,37 | -0,06 | -0,18 |
| SCA | -0,23 | -0,03 | 0,31 | 0,19 | 0,16 | 0,16 | 0,12 | 0,13 | -0,04 | 0,06 | 0,20 | 0,50 |
| POL | -0,06 | -0,33 | 0,19 | 0,18 | -0,03 | 0,15 | 0,01 | 0,16 | 0,00 | -0,38 | -0,25 | 0,09 |
| <i>Период 1995—2018</i> | | | | | | | | | | | | |
| NAO | -0,11 | -0,27 | 0,44 | -0,37 | -0,15 | 0,05 | -0,06 | -0,21 | -0,12 | 0,18 | -0,44 | -0,09 |
| EA | 0,12 | -0,21 | -0,14 | 0,11 | -0,18 | -0,47 | 0,04 | -0,01 | -0,51 | -0,21 | 0,15 | -0,21 |
| WP | 0,20 | 0,30 | -0,22 | 0,44 | -0,13 | -0,26 | -0,22 | 0,23 | 0,15 | 0,26 | 0,17 | 0,14 |
| EP/NP | -0,11 | -0,07 | -0,03 | -0,12 | 0,17 | -0,32 | -0,28 | -0,18 | 0,00 | -0,45 | 0,01 | 0,00 |
| EA/WR | 0,11 | 0,08 | -0,21 | -0,35 | -0,24 | -0,14 | -0,22 | -0,04 | 0,25 | -0,46 | -0,19 | -0,18 |
| SCA | -0,47 | 0,18 | 0,20 | 0,45 | -0,20 | 0,63 | -0,12 | 0,09 | 0,28 | -0,04 | 0,27 | -0,18 |
| POL | 0,13 | -0,04 | 0,27 | 0,40 | 0,16 | 0,10 | 0,31 | 0,17 | 0,38 | 0,29 | 0,14 | 0,33 |

В результате отмечено увеличение взаимозависимости между АОТ и общей циркуляцией атмосферы в поствулканический период во все месяцы года. Эта зависимость имеет разную направленность в зимнее и летнее время. Для Северного полушария во внетропических широтах наиболее значительно влияние Североатлантического и Скандинавского индексов.

а)



б)

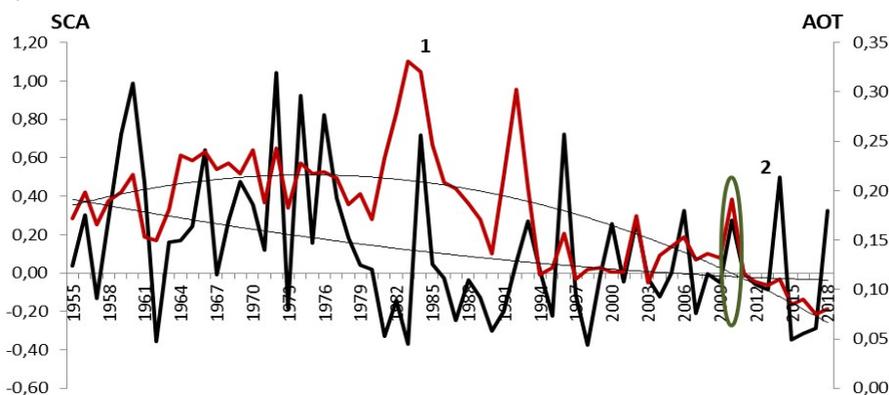


Рис. 8. Изменение АОТ (1) и индексов атмосферной циркуляции (2):

а) АОТ и Североатлантический индекс NAO,

б) АОТ и Скандинавский индекс SKA.

Овалом выделен 2010 год.

Индекс NAO представляет собой разность нормированных аномалий давления в двух точках: Азорский максимум и Исландский минимум. В положительной фазе индекса NAO происходит усиление зональной циркуляции, при отрицательной фазе — усиление меридиональных процессов. Индекс SCA — разность давления над Скандинавским полуостровом и слабым центром действия над Западной Европой и Восточной Россией. В положительной фазе индекса SCA над Европейской территорией России (ЕТР) наблюдаются блокирующие антициклоны. В отрицательную фазу антициклон ослабевает. Одним из возможных объяснений колебаний значений АОТ в различные фазы индексов атмосферной циркуляции NAO и SCA можно считать связанные с ними заточки воздушных масс с различными аэрозольными характеристиками и создание условий для накопления или рассеивания аэрозоля над Москвой. Так в 2010 году индексы находились в противоположных фазах, демонстрируя усиления меридионального переноса (рис.8).

Летом 2010 года над Европейской территорией России сформировался долгоживущий блокирующий антициклон. При таких синоптических условиях шло накопление аэрозольных частиц в атмосфере, а возникшие лесные и торфяные пожары привели к увеличению АОТ до экстремальных значений (Чубарова и др.,2011). Тем не менее, надо признать, что анализ соответствия изменчивости АОТ и индексов циркуляции атмосферы носит качественный характер. Оценка параметров значимости разности между значениями АОТ при различных фазах индекса, рассмотрение коэффициентов множественной регрессии (с учетом других факторов, влияющих на изменчивость АОТ) результатов не дали. Процесс более сложный: например, с одной стороны при уменьшении индекса NAO будет увеличиваться интенсивность меридионального переноса, при этом Москва может попадать как в южные, так и северные потоки; а с другой — это может быть результатом увеличения повторяемости стационарных антициклонов. Эти ситуации по-разному влияют на накопление аэрозольных частиц в атмосфере.

Заключение

XXI век характеризуется существенным повышением прозрачности атмосферы. В отсутствие вулканического аэрозоля в атмосфере, средние месячные и годовые значения АОТ свидетельствуют о значимом снижении, усиливающемся в последние годы. Местные кратковременные события, такие как дымная мгла от лесных пожаров, а также уменьшение периода с устойчивым снежным покровом в Москве, не привели к изменению этой тенденции. Уменьшение антропогенной составляющей аэрозольной мутности явилось отражением действий Правительства Москвы по улучшению экологии города. Все эти факторы и проявление единых тенденций изменения АОТ на станциях Европы свидетельствуют о роли глобальных процессов в формировании уровня аэрозольного загрязнения. Одной из основных причин выявленных тенденций может быть изменение циркуляции атмосферы в Северном полушарии. Но приведенные в работе результаты сравнения АОТ в различные периоды во взаимосвязи с межгодовой изменчивостью индексов циркуляции, характеризующих синоптические особенности Северного полушария, носят качественный характер. Для обоснования подобных зависимостей необходимо привлекать данные, характеризующие изменения АОТ на больших территориях, сравнимых с синоптическими образованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абакумова Г. М., Горбаренко Е. В. (2008). Прозрачность атмосферы в Москве за последние 50 лет и её изменения на территории России. — М.: Издательство ЛКИ. 192 с.

Абакумова Г. М., Евневич Т. В., Никольская Н. П. (1983). Влияние города на прозрачность атмосферы. — М.: Изд-во МГУ. 96 с.

Горбаренко Е. В. (2003). Аэрозольная мутность атмосферы в Москве в конце XX века. // Метеорология и гидрология. № 7. С. 13—18.

Горбаренко Е. В., Ерохина А. Е., Лукин А. Б. (2006). Многолетние изменения аэрозольной оптической толщины атмосферы в России // Метеорология и гидрология. № 7. С. 41—48.

Горбаренко Е. В., Рублев А. Н. (2016.) Многолетние изменения оптической толщины аэрозоля в Москве с учетом коррекции в сильно замутненной атмосфере. // Изв. РАН. ФАО. Т. 52. № 2. С. 213—221.

Евневич Т. В. (1967). Эмпирические формулы для определения общего влагосодержания атмосферы над Москвой / в кн.: Радиационный режим и осадки в Москве. — М.: Изд-во МГУ. С. 277—285.

Евневич Т. В., Савиковский И. А. (1989). Расчет прямой солнечной радиации и коэффициента прозрачности атмосферы. // Метеорология и гидрология. № 5. С. 106—109.

Еремينا И. Д., Чубарова Н. Е., Алексеева Л. И., Суркова Г. В. (2014). Кислотность и химический состав осадков на территории Московского региона в теплый период года. // Вестник МГУ. Сер. 5. География. № 5. С. 3—11.

Жданова Е. Ю., Хлестова Ю. О., Чубарова Н. Е. (2019). Тренды характеристик атмосферного аэрозоля в Москве по данным многолетних измерений сети AERONET // Оптика атмосферы и океана. Т. 32. № 6. С. 443—448.

Кононова Н. В. (2013). Изменения циркуляции атмосферы северного полушария в XX-XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. Том 1. С. 133—162.

Махоткина Е. Л., Плахина И. Н. (2014). Мониторинг прозрачности атмосферы: результаты измерений за последние десятилетия // Труды ГГО. Вып. 572. С. 57—88.

Махоткина Е. Л., Плахина И. Н., Махоткин А. Н. (2015). Прозрачность атмосферы на территории России: изменения в последние 40 лет // Труды ГГО. Вып. 579. С. 162—177.

Попова В. В., Мацковский В. В., Михайлов А. Ю. (2018). Современные изменения климата суши внетропической зоны северного полушария // Вестник МГУ. Серия 5. География. № 1. С. 3—12.

Русина Е. Н., Радионов В. Ф., Сибир Е. Е. (2016). Результаты мониторинга аэрозольной составляющей атмосферы в средних и высоких широтах и над акваторией Мирового океана. // Проблемы Арктики и Антарктики. № 2. С. 5—15.

Сакерин С. М., Андреев С. Ю., Кабанов Д. М., Николашкин С. В., Прахов А. Н., Радионов В. Ф., Турчинович Ю. С., Чернов Д. Г., Holben В. N., Smirnov A., Sorokin M. G. (2014). О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в арктических районах // Оптика атмосферы и океана. Т 27. № 5. С. 414— 423

Ситнов С. А., Мохов И. И., Горчаков Г. И., Джола А. В. (2017). Дымная мгла над европейской территорией России летом 2016 года: связь с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. № 8. С. 50—64.

Справочник эколого-климатических характеристик Москвы. (2005). — М.: Изд-во МГУ. Т. 2. 409 с.

Тарасова Т. А., Ярхо Е. В. (1991). Определение аэрозольной оптической толщины атмосферы по наземным измерениям интегральной солнечной радиации // *Метеорология и гидрология*. № 12. С. 66—71.

Чубарова Н. Е., Горбаренко Е. В., Незваль Е. И., Шиловцева О. А. (2011). Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных и торфяных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмосковье. // *Известия РАН. ФАО*. Т. 47. № 6. С. 790—800.

Hurrell et al. (2003) The north atlantic oscillation: climatic significance and environmental impact // *Geophysical monograph series*. 134. P. 1—279.

Holben et al. (2001). Emerging ground-based aerosol climatology // *J. Geophys. Res.* V. 106. № D11, 12,067–12,097, JUNE 16.

Ohvriil H., Teral H., Neiman L. et al. (2009). Variability of atmospheric column transparency in the Baltic region, 1906-2006. // *J. Geophys. Res.* V. 114. D00D12; doi: 10.1029/2008JD010644.

Li J., Carlson B. E., Dubik O., Lacis A. A. (2014). Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 14. P. 12271—12289.