

УДК 551.510.42

О природе долгопериодных вариаций массовой концентрации приземного аэрозоля

А.Н. Груздев, А.А. Исаков*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 1.06.2015 г.

По результатам измерений массовой концентрации приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН выполнен анализ вариаций концентрации аэрозоля с периодами более 1 мес. Показано, что вариации могут быть связаны с периодичностями повторяемости траекторий атмосферного переноса с определенных направлений. Рассмотрены случаи, когда долговременные вариации концентрации аэрозоля обусловлены эпизодами повышенных или пониженных значений концентрации, вызванных адвекцией аэрозоля с соответствующих направлений. Обнаружено, в частности, что 1,5-месячные вариации массовой концентрации аэрозоля в 1995 г. обусловлены 1,5-месячной повторяемостью максимумов концентрации, вызванных переносом с юго-восточного направления. Трехмесячная периодичность эпизодов переноса со стороны Балтики и Северной Атлантики в 2004 г. проявилась в 3-месячной повторяемости минимумов концентрации аэрозоля. Выявлена статистическая связь концентрации приземного аэрозоля с динамикой арктической верхней тропосферы.

Ключевые слова: аэрозоль, массовая концентрация, долгопериодные вариации; aerosol, mass concentration, long-period variations.

Введение

Физические и химические характеристики приземного аэрозоля в средних широтах России испытывают вариации в широком диапазоне масштабов от суток до сезона [1–6]. Межсуточная изменчивость аэрозоля в значительной степени обусловлена сменой воздушных масс в результате синоптической активности. В отдельных работах выявлены вариации различных параметров аэрозоля с периодами в диапазоне от 10 дней до 3 мес [4, 5, 7, 8]. В целом природа долгопериодных вариаций изучена недостаточно. В настоящей статье представлен анализ долгопериодных вариаций массовой концентрации приземного аэрозоля по данным измерений в 1991–2013 гг. на Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, расположенной в 50 км западнее Москвы.

Аппаратура и методы анализа данных измерений

Аэрозольные измерения в 1991–2003 гг. велись с помощью проточного нефелометра В.Н. Сидоровым [9], а с 2001 г. и по настоящее время они выполняются нами с помощью спектрополяриметра, регистрирующего поляризационные компоненты индикатрисы рассеяния под углом 45° на длине волны 0,54 мкм. Аппаратура и методика измерений

описаны в [4, 5]. Погрешность определения индикатрисы рассеяния составляет 5–7% и в основном обусловлена естественными флуктуациями концентрации аэрозоля. Начиная с 2008 г. измерения на спектрополяриметре дублируются измерениями на серийном приборе ФАН.

В работе также использованы данные реанализа ERA-Interim о давлении и геопотенциале (<http://apps.ecmwf.int/datasets/>).

Для анализа данных измерений применялись различные методы. Метод скользящего осреднения позволяет отфильтровать высокочастотные составляющие изменчивости и сделать более наглядной картину низкочастотных вариаций. Техника спектрального анализа с помощью метода максимальной энтропии, обеспечивающая повышенное спектральное разрешение, позволяет выявлять периодичности с временными масштабами, приближающимися к длине ряда ($\sim 1/3$ длины ряда), и полезна для анализа низкочастотных вариаций [10]. Она использована для скользящего спектрального (спектрально-временного) анализа данных измерений.

Траектории переноса аэрозоля на ЗНС определялись с помощью траекторной модели HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

Для оценки статистической связи массовой концентрации аэрозоля с атмосферными параметрами применялась модель множественной линейной регрессии:

$$m(t_n) = a_0 + a_1 h(t_n - t_h) + a_2 p(t_n - t_p) + \varepsilon(t_n),$$
$$n = 1, \dots, N, \quad (1)$$

* Александр Николаевич Груздев (a.n.gruzdev@mail.ru); Андрей Александрович Исаков (a.a.isakov@mail.ru).

где m – зависимая переменная (концентрация аэрозоля); h и p – независимые переменные (циркуляционные параметры); N – количество членов ряда; t_n – время; t_h и t_p – временные задержки; a_0 – свободный член; a_1 , a_2 – искомые коэффициенты регрессии; ε – остаточный ряд.

Результаты анализа и их обсуждение

На рис. 1, *а* представлены среднесуточные значения массовой концентрации аэрозоля и их 30-дневное скользящее среднее в течение 23 лет изме-

рений, а на рис. 1, *б* – скользящий спектр мощности флуктуаций концентрации аэрозоля, рассчитанный по скользящему двухгодовому интервалу с помощью метода максимальной энтропии.

Согласно рис. 1, *а, б*, амплитуды и периоды вариаций массовой концентрации аэрозоля непостоянны, а череда лет с 2004 по 2010 г. характеризуется повышенными значениями концентрации и амплитуды ее вариаций. Изменяющийся со временем спектр содержит спектральные максимумы в широком диапазоне периодов от нескольких суток до полугода. В частности, на рис. 1, *а* можно выделить

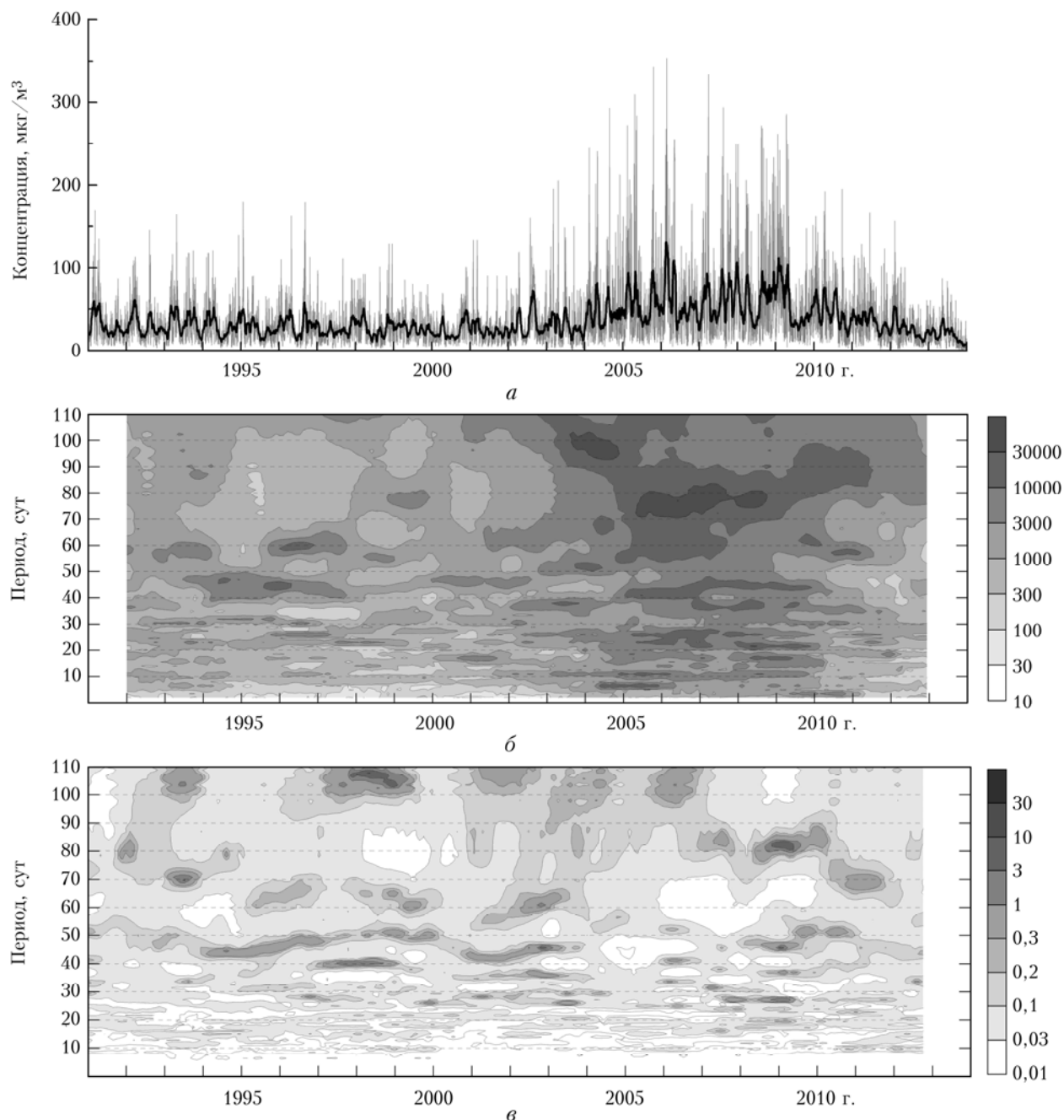


Рис. 1. Среднесуточные значения массовой концентрации аэрозоля (серая кривая) и их скользящее месячное среднее (черная кривая) (*а*); скользящие спектры мощности флуктуаций концентрации аэрозоля (*б*) и высоты изобарической поверхности 500 гПа в Арктическом регионе (*в*). Единицы спектральной плотности: $(\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3})^2 \cdot \text{сут}$ (*б*); $\text{км}^2 \cdot \text{сут}$ (*в*)

цуг регулярных полугодовых колебаний концентрации аэрозоля в 1993–1994 гг. и цуг 2,5-месячных колебаний в период с середины 2007 г. до середины 2008 г. Характерная особенность изменчивости концентрации аэрозоля – 40–50-суточные вариации на протяжении практически всего периода измерений (см. рис. 1, б). Отметим также вариации с периодами 75–85 сут в 2005–2010 гг. и вариации с периодами в диапазоне 100–120 сут в 1998–2004 гг.

Изменения концентрации аэрозоля в неподвижной точке наблюдений обусловлены изменением баланса его образования и стока, а также дивергенцией потока аэрозоля. Скорость образования аэрозоля зависит, среди прочего, от температуры и освещенности, изменяющихся в результате синоптических процессов, характерный пространственный масштаб которых составляет порядка 1000 км, а временной масштаб – несколько суток. Дивергенция потока аэрозоля в основном определяется неоднородностью пространственного распределения аэрозоля и вблизи земной поверхности выражается через горизонтальную адвекцию и вертикальное перемешивание, поэтому колебания концентрации аэрозоля в пункте наблюдений могут быть вызваны периодичностью переноса с определенных направлений.

Для проверки этого предположения воспользуемся обратным траекторным анализом. С помощью траекторной модели HYSPLIT были рассчитаны трехсуточные траектории переноса с высотой «прихода» на ЗНС 100 м. Направления были разбиты на восемь секторов по 45° каждый с отсчетом по часовой стрелке от направления на север. Сектор 1 приблизительно соответствует переносу со стороны Российской Арктики и Полярного Урала; 2 – со стороны Поволжья и Среднего Урала; 3 – из аридной зоны южного Поволжья, Прикаспия и Северного Казахстана; 4 – со стороны Ростовской области, Кавказа и Турции; 5 – с Украины и Средиземноморья; 6 – из Центральной Европы; 7 – с Балтики и Северной Атлантики; 8 – из Скандинавии и с Баренцева моря. Для выбранного временного интервала (обычно годовой длительности) формировалось восемь (по количеству секторов) числовых массивов. Если траектория переноса соответствовала данному сектору, то значение элемента массива для даты «прихода» приравнивалось номеру сектора, а если не соответствовала – то нулю.

Отдельные механизмы формирования периодичностей приземной концентрации аэрозоля будут продемонстрированы на примере данных за 1995 и 2004 гг. Эти годы, согласно рис. 1, б, характеризуются сильно различающимися по периоду вариациями концентрации аэрозоля с периодами ~ 45 и 90–100 сут соответственно.

На рис. 2 приведены средние значения массовой концентрации аэрозоля, соответствующие переносу из выбранных секторов, для 1995 и 2004 гг., а также для 2007 г., характеризующегося высокими значениями концентрации аэрозоля (см. рис. 1, а). Формы кривых для 1995 и 2007 гг. качественно подобны, несмотря на большие различия концентрации аэрозоля. Такой характер зависимости кон-

центрации от направления переноса довольно типичен для ЗНС. Повышенные значения массовой концентрации аэрозоля обычно наблюдаются при восточном и юго-восточном переносе, а пониженные значения – при переносе с северного и северо-западного направлений. В 2004 г. характер зависимости отличался. Абсолютный максимум средней по секторам концентрации аэрозоля связан с юго-западным переносом.

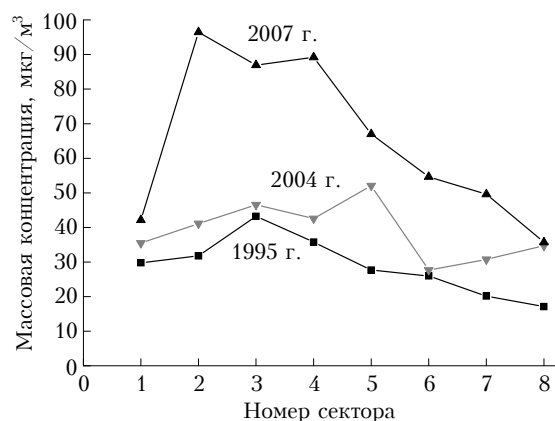


Рис. 2. Среднее значение массовой концентрации аэрозоля как функция сектора в 1995, 2004 и 2007 гг.

Частота повторяемости траекторий из различных секторов тоже неодинакова. Ее максимум соответствует сектору 7. Продемонстрируем роль переноса в долгопериодных колебаниях массовой концентрации аэрозоля. На рис. 3, а символами и тонкой кривой показано, как изменялось день ото дня направление переноса в 1995 г. В течение года доминировал перенос из сектора 7, который, согласно рис. 2, в целом связан с низкими значениями концентрации аэрозоля.

Относительно длительные интервалы переноса из 7-го и соседних секторов прерывались более короткими интервалами с переносом из восточного и юго-восточного направлений. Скользящие месячные средние значения номера сектора и концентрации аэрозоля выявляют противофазные друг другу долгопериодные вариации этих величин на рис. 3, а. Из рис. 3 следует, что колебания концентрации аэрозоля с периодом около 1,5 мес в первой половине 1995 г. связаны с периодичностью повторяемости интервалов с юго-восточным переносом (в основном из сектора 3). Таким образом, 1,5-месячные вариации массовой концентрации аэрозоля в 1995 г. (см. рис. 1, а) обусловлены 1,5-месячной повторяемостью максимумов концентрации, вызванных переносом из 3-го сектора.

На рис. 3, б приведены сглаженные скользящим месячным осреднением частоты переноса из 1-го и 7-го секторов и скользящее месячное среднее концентрации аэрозоля в 2004 г. И частоты, и концентрация испытывают колебания со средним периодом около 3 мес (95–100 сут на рис. 1, а). Колебания концентрации аэрозоля находятся в фазе с частотой переноса из 1-го сектора и противофазы частоте переноса из 7-го сектора.

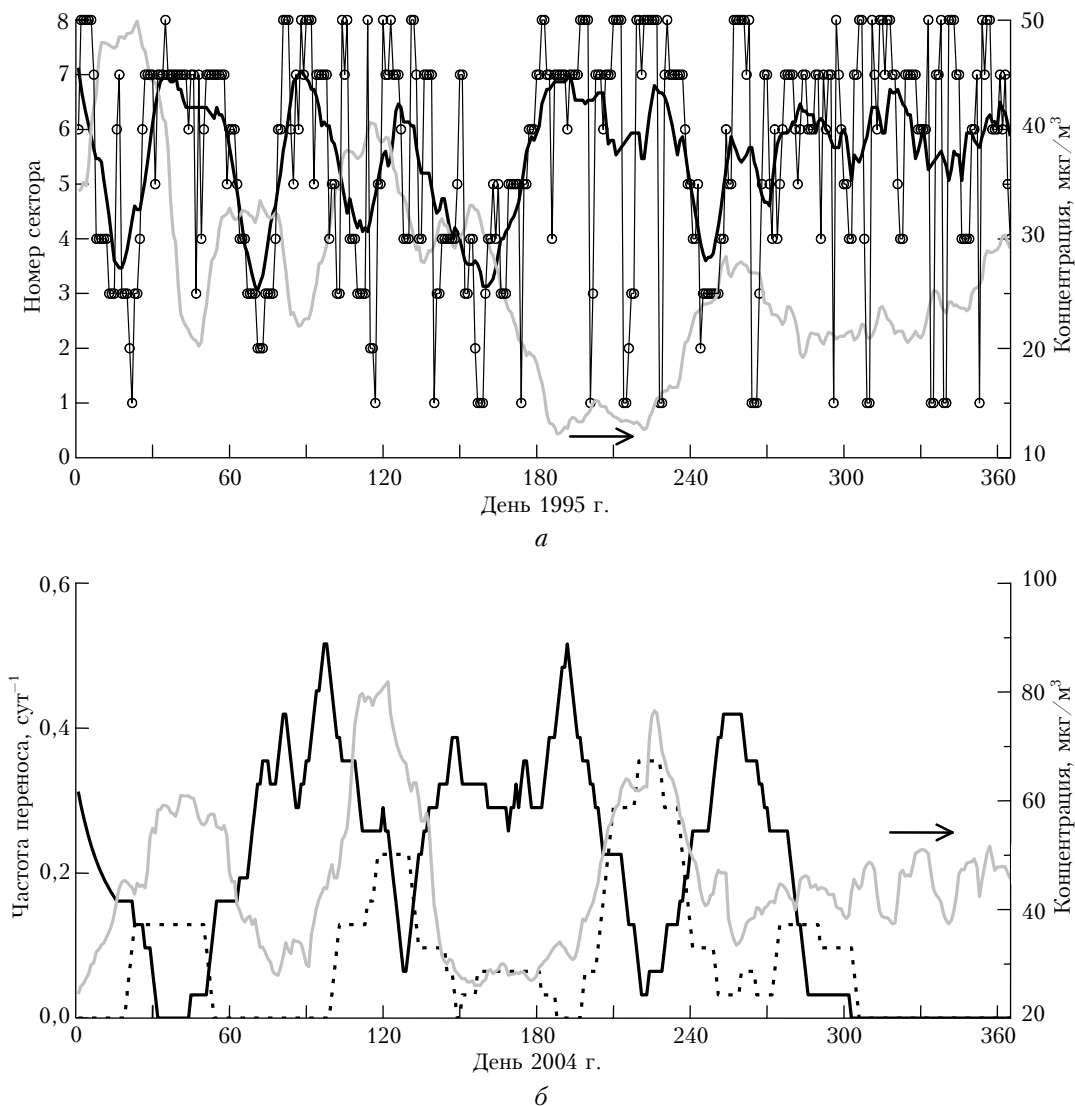


Рис. 3. Номера сектора переноса в зависимости от дня года (кружочки и тонкая кривая), их скользящее месячное среднее (черная жирная кривая) и скользящее месячное среднее массовой концентрации аэрозоля (серая кривая) в 1995 г. (а); скользящие месячные средние частот переноса из секторов 1 (пунктирная кривая) и 7 (сплошная черная кривая) и массовой концентрации аэрозоля (серая кривая) в 2004 г. (б)

Трехмесячная периодичность эпизодов переноса из 7-го сектора приводит к 3-месячной повторяемости минимумов концентрации аэрозоля. Противофазная ей 100-суточная повторяемость переноса из сектора 1 также (согласно рис. 2) сопровождается локальными понижениями концентрации аэрозоля, и в результате, наряду с доминирующими 100-суточными колебаниями, в концентрации аэрозоля присутствуют и вариации с половинным периодом (~ 50 сут на рис. 1, а).

Попытаемся найти аналогии в изменчивости массовой концентрации аэрозоля и атмосферной циркуляции. Воспользуемся данными реанализа ERA-Interim. На рис. 1, б представлен скользящий спектр геопотенциала на изобарической поверхности 500 гПа, осредненного по арктической области севернее 70° с.ш. в долготном секторе 30–45° в.д. (долгота Москвы около 38°). Отметим, что спектр геопотенциала малочувствителен к варьированию

ширины долготного сектора, но чувствителен к варьированию широты. На рис. 1, в приведен спектр, визуально наиболее похожий на спектр концентрации аэрозоля на рис. 1, а. На нем, как и на аэрозольном спектре, проявились вариации с периодами 40–50 сут на протяжении практически всего рассматриваемого временного интервала, с периодами 100–110 сут в интервале с конца 1990-х по вторую половину 2000-х гг. и даже вариации с отмеченным выше периодом вблизи 50 сут в 2004 г.

Для оценки статистической связи массовой концентрации аэрозоля с атмосферной циркуляцией используем модель множественной линейной регрессии (1). Поскольку статистика приземной концентрации аэрозоля соответствует логнормальному распределению, то в качестве зависимой переменной m рассмотрим нормированное значение логарифма массовой концентрации аэрозоля, рассчитанное путем деления логарифма концентрации на

его скользящее среднего значение. Переменная h в (1) – осредненный по арктической области в пределах от 70° с.ш. до северного полюса и от 30 до 45° в.д. геопотенциал на различных изобарических поверхностях, нормированный на его среднее за 1991–2013 гг. значение. Переменная p – приземное давление в Московском регионе, нормированное на его среднее за 1991–2013 гг. значение. Поскольку нас интересуют долгопериодные вариации, то все данные были предварительно сглажены скользящим осреднением по 21 сут. Выполнено две серии расчетов по модели (1). Одна – с исходными данными, а в другой серии расчетов из независимых переменных p и h предварительно был исключен годовой ход по методу [11].

Системы уравнений (1) решались методом наименьших квадратов при варьировании временных задержек t_h и t_p . Окончательные значения задержек определялись из условия максимума коэффициента множественной линейной корреляции [12]. Статистическая значимость коэффициентов корреляции и регрессии оценивалась с учетом потери степеней свободы при сглаживании данных. В результате оказалось, что значения коэффициента регрессии на приземное давление a_2 статистически незначимы. Поэтому величина задержки t_p не влияет существенно на окончательный результат, и ниже приводятся результаты расчетов при $t_p = 0$.

Коэффициент множественной линейной корреляции и соответствующий ему коэффициент регрессии на геопотенциал a_1 , полученные по исходным данным, показаны на рис. 4 кривыми 1 и 2 соответственно в зависимости от давления на изобарической поверхности, для которой использованы значения геопотенциала.

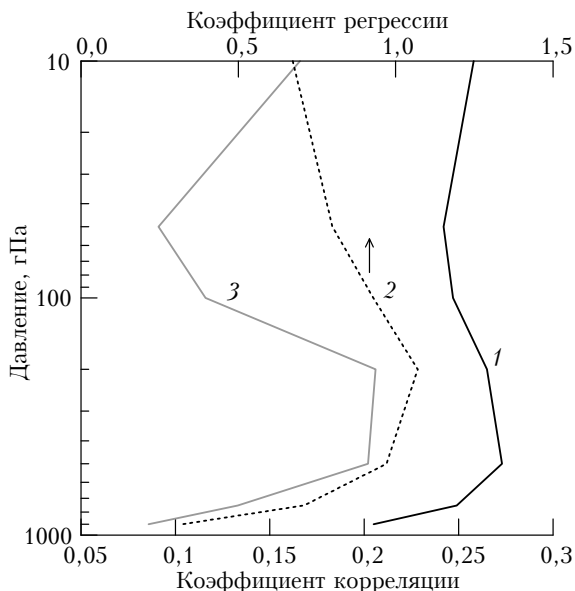


Рис. 4. Коэффициент множественной линейной корреляции (1) и соответствующий ему коэффициент регрессии на геопотенциал (2), рассчитанные по исходным данным; коэффициент множественной линейной корреляции для случая, когда из независимых переменных исключен годовой ход (3)

Коэффициенты корреляции статистически достоверны с уровнем значимости меньше 1%. Значения коэффициентов корреляции и регрессии соответствуют задержке зависимой переменной m относительно геопотенциала h на величину 35–43 сут. Максимальное значение коэффициента корреляции 0,27 получено при использовании в качестве h геопотенциала на поверхности 500 гПа, а максимальное значение коэффициента регрессии – для геопотенциала на поверхности 200 гПа.

Кривой 3 на рис. 4 показан коэффициент множественной линейной корреляции для случая, когда из данных о геопотенциале и приземном давлении были исключены годовые циклы, при этом величина задержки t_h принята той же, что и в случае кривой 1. Сопоставление кривых 1 и 3 указывает на то, что статистическая связь концентрации аэрозоля с геопотенциалом в определенной степени зависит от годового цикла геопотенциала, несмотря на то, что концентрация аэрозоля не испытывает четких годовых колебаний (см. рис. 1, а). В верхней тропосфере (500–200 гПа) зависимость от годового хода невелика, и коэффициенты корреляции в первом и втором случаях имеют одинаковый порядок величины.

Таким образом, вариации массовой концентрации приземного аэрозоля на ЗНС статистически связаны с изменениями геопотенциала в верхней тропосфере арктической области. Величина коэффициента линейной корреляции в данном случае непринципиальна. Эта связь, скорее всего, нелинейная и, конечно же, опосредованная. Важно, что она статистически достоверна. Связь предположительно осуществляется через влияние динамических процессов в арктической области на синоптические процессы в нижней атмосфере и проявляется, в частности, в низкочастотной модуляции направления воздушного переноса, изменяющегося при прохождении синоптических возмущений. Фазовая задержка t_h зависит, по-видимому, не только от характерного времени взаимодействия между динамическими процессами в верхней и нижней тропосфере, но и от географического распределения основных источников приземного аэрозоля.

Заключение

По результатам измерений массовой концентрации приземного аэрозоля на ЗНС в 1991–2013 гг. выполнен анализ вариаций концентрации аэрозоля с периодами более 1 мес. Показано, что долгопериодные вариации массовой концентрации приземного аэрозоля на ЗНС связаны с периодичностью повторяемости траекторий атмосферного переноса с определенных направлений. Обнаружено, в частности, что 1,5-месячные вариации массовой концентрации аэрозоля в 1995 г. обусловлены 1,5-месячной повторяемостью максимумов концентрации, вызванных переносом с юго-восточного направления. Трехмесячная периодичность эпизодов переноса со стороны Балтики и Северной Атлантики в 2004 г. проявилась в 3-месячной повто-

ряемости минимумов концентрации аэрозоля. Противофазная ей 100-суточная повторяемость переноса со стороны Российской Арктики и Полярного Урала также сопровождалась локальными понижениями концентрации аэрозоля, и в результате наряду с доминирующими 100-суточными колебаниями в концентрации аэрозоля в 2004 г. присутствуют и вариации с половинным периодом ~ 50 сут.

Рассмотренные случаи демонстрируют один из механизмов долговременных вариаций приземной концентрации аэрозоля, проявляющийся в данных наблюдений путем формирования эпизодов повышенных или пониженных значений концентрации, вызванных адвекцией аэрозоля с соответствующих направлений.

Выявлена статистическая связь вариаций концентрации приземного аэрозоля на ЗНС с динамикой арктической верхней тропосферы.

1. Сидоров В.Н., Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.В. Суточный ход оптических и микрофизических характеристик приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физика атмосфер. и океана. 1984. Т. 20, № 12. С. 1156–1164.
2. Хуторова О.Г., Теттин Г.М. Сезонная изменчивость спектра вариаций атмосферных параметров приземного слоя // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 7. С. 645–647.
3. Панченко М.В., Терпугова С.А., Козлов В.С., Полькин В.В., Яушева Е.П. Годовой ход конденсационной активности аэрозоля в приземном слое атмосферы За-

падной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 678–683.

4. Исаков А.А., Груздев А.Н., Тихонов А.В. О долгопериодных вариациях оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 393–399.
5. Исаков А.А., Груздев А.Н. Долгопериодные вариации оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физика атмосфер. и океана. 2009. Т. 45, № 2. С. 245–254.
6. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 561–569.
7. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О. Оптическая погода. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1990. 192 с.
8. Шукурова Л.М., Груздев А.Н. Временная изменчивость химического состава приземного аэрозоля в Подмоскowie в 1999–2005 гг. по результатам ИК-спектроскопии аэрозольных проб // Изв. РАН. Физика атмосфер. и океана. 2010. Т. 46, № 3. С. 332–346.
9. Сидоров В.Н. Сезонный и суточный ход содержания сухой фракции субмикронного аэрозоля в приземном слое // Труды междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля». Москва, 12–17 апреля, 1999. М.: Диалог МГУ, 1999. С. 356–367.
10. Кей С.М., Марпл С.Л. Современные методы спектрального анализа: обзор // ТИИЭР. 1981. Т. 69, № 11. С. 5–51.
11. Груздев А.Н. О недельной цикличности в атмосфере // Докл. РАН. 2011. Т. 439, № 3. С. 407–412.
12. Пановский Г.А., Брайер Г.В. Статистические методы в метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1972. 210 с.

A.N. Gruzdev, A.A. Isakov. On the nature of long-period variations in the mass concentration of the near-surface aerosol.

Using the results of measurements of the mass concentration of the near-surface aerosol at Zvenigorod Scientific Station of the A.M. Obukhov Institute of Atmosphere Physics, Russian Academy of Sciences, the analysis of variations in the aerosol concentration with periods of more than 1 month is done. It is shown that the variations can be associated with the periodicities in the recurrences of trajectories of atmospheric transport from certain directions. Cases are considered when long-period variations of aerosol concentration are due to episodes of enhanced or reduced concentrations resulted from aerosol advection from appropriate directions. It is found in particular that the 1.5-month variations of the mass aerosol concentration in 1995 were due to the 1.5-month recurrence of the concentration maxima caused by transport from the south-east direction. The three-month periodicity of transport episodes from Baltic and North Atlantic in 2004 manifests itself through the 3-month recurrence of the aerosol concentration minima. A statistical relation of the near-surface aerosol concentration to dynamics of the Arctic upper troposphere is revealed.