

УДК 551.510.42

## АНОМАЛИИ И ТРЕНДЫ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИЗЕМНОГО АЭРОЗОЛЯ В ЗАПАДНОМ ПОДМОСКОВЬЕ

© 2021 г. А. Н. Груздев<sup>а, \*</sup>, А. А. Исаков<sup>а, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: a.n.gruzdev@mail.ru

\*\*e-mail: a.a.isakov@mail.ru

Поступила в редакцию 09.03.2021 г.

После доработки 10.04.2021 г.

Принята к публикации 14.04.2021 г.

Приводятся результаты анализа аномалий и многолетних трендов массовой концентрации приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН по результатам измерений в 1991–2019 гг. Анализ выполнен с учетом зависимости концентрации аэрозоля от направления ветра. Рассмотрены три последовательных периода, существенно различающихся содержанием и изменчивостью аэрозоля: 1991–2002, 2003–2012 и 2013–2019 гг. Второй из них характеризуется частыми и особенно сильными аномалиями высоких значений концентрации аэрозоля. Определены отдельные направления и секторы направлений ветра, с наибольшей вероятностью способствующие низким и высоким значениям концентрации аэрозоля. Для всех трех периодов получены оценки линейных трендов аэрозоля, отличающиеся по величине и особенностям годового хода. Статистически значимые сезонные оценки трендов получены для зимы и весны периода 1, зимы, весны и осени периода 2, весны, лета и осени периода 3. Годовые оценки трендов отрицательные для всех периодов. Массовая концентрация приземного аэрозоля за последние 30 лет в целом уменьшилась, хотя уменьшение было неравномерным.

**Ключевые слова:** аэрозоль, массовая концентрация, тренд, аномалии

**DOI:** 10.31857/S0002351521040064

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферный аэрозоль может поступать в атмосферу напрямую с земной поверхности и генерироваться в атмосфере в результате разнообразных физических, химических и биологических процессов [1–3]. Распределение аэрозоля и его источников в приземном слое атмосферы сильно неоднородно [4–7]. Поэтому содержание аэрозоля в каком-либо пункте наблюдений определяется местными условиями и атмосферным переносом.

На Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, расположенной в сельской местности западнее Москвы, с 1991 г. выполняются регулярные измерения массовой концентрации приземного аэрозоля. На основании этих данных в [8, 9] получены оценки трендов аэрозоля в 1991–2002 и 2013–2018 гг. (в [9] – в 2013–2019 гг.). Период 2003–2012 гг. был исключен из анализа из-за частых аномально высоких значений концентрации аэрозоля, причина которых неясна. Для периодов 1991–2002 и 2013–2019 гг. получены отрицательные оценки трендов концентрации аэрозоля. Отрицательный знак трендов укладывается в общую

тенденцию уменьшения содержания приземного аэрозоля, свойственную западной Европе (см. обзор литературы в [8, 9]). Однако аэрозольные тренды на ЗНС имеют характерные особенности. Одна из них заключается в наличии ярко выраженной сезонной зависимости трендов, а другая – в том, что уменьшение концентрации аэрозоля в 2013–2019 гг. существенно сильнее, чем в 1991–2002 гг. Таким образом, долговременные тенденции приземного аэрозоля, выраженные в виде оценок линейных трендов, изменяются со временем.

Выпавший из предшествующего анализа период 2003–2012 гг. представляет интерес. Повышение содержания приземного аэрозоля в течение такого длительного периода должно иметь долговременную причину. Ее можно предположительно связать с наличием дополнительного, возможно, регионального источника аэрозоля и/или с изменением атмосферного переноса такого рода, что в этот период чаще, чем обычно, имел место перенос из регионов с высоким содержанием аэрозоля. Выявление тенденций изменения концентрации аэрозоля в 10-летний период 2003–2012 гг. позволило бы дать более полную

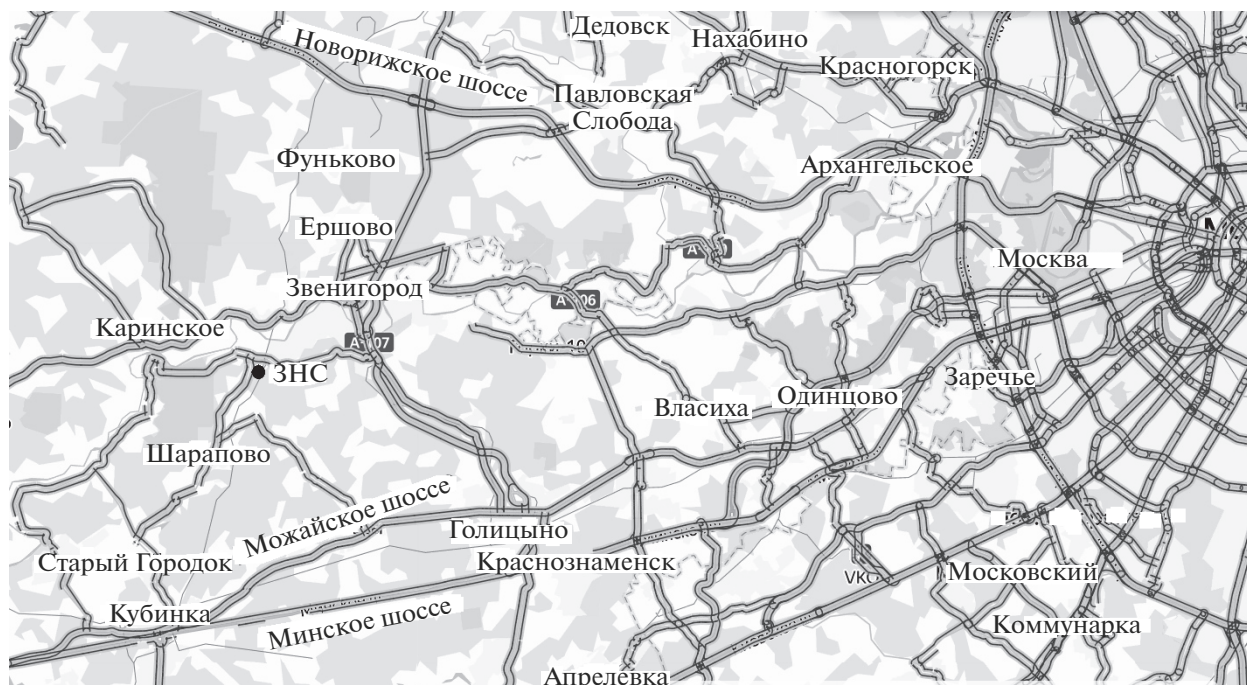


Рис. 1. Карта западного Подмосквья с автодорогами. Положение ЗНС отмечено черным кружком.

картину аэрозольных трендов в течение всего, почти 30-летнего, периода измерений на ЗНС.

Цель представленной работы состоит в анализе аномалий приземной концентрации аэрозоля на ЗНС в 2003–2012 гг. в сравнении с предшествующим 12-летним периодом и оценке аэрозольных трендов в течение этих периодов. Для этого будут получены распределения аномалий концентрации аэрозоля в зависимости от направления атмосферного переноса. Оценка трендов аэрозоля будет получена с помощью модели множественной линейной регрессии, в которой учтена возможная зависимость концентрации аэрозоля от направления ветра.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПУНКТА И ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Положение Звенигородской научной станции демонстрирует рис. 1. Она расположена в лесистой сельской местности западного Подмосквья. Ее расстояние от Московской кольцевой автодороги составляет немногим менее 40 км. На расстоянии 10 и 13 км южнее ЗНС проходят Можайское и Минское шоссе, а в 17 км севернее идет Новорижское шоссе — крупные автомагистрали с интенсивным движением.

Измерения массовой концентрации приземного аэрозоля на ЗНС начаты в 1991 г. Измерения с 1991 по 2003 г. выполнялись круглосуточно на проточном нефелометре В.Н. Сидоровым (ПНС) [10]. В 2001–2012 гг. проводились измерения на

спектрополяриметре (СП), регистрирующем поляризационные компоненты индикатрисы рассеяния под углом  $45^\circ$  на длине волны  $0.54 \text{ мкм}$ . Прибор, его калибровка и методика измерений описаны в [11–13]. С 2012 г. проводятся измерения на серийном нефелометре ФАН. Работа всех приборов основана на едином принципе — регистрации интенсивности рассеянного под углом  $45^\circ$  света в проточной камере. Длины волн регистрируемого сигнала в трех приборах близки между собой.

Остановимся подробнее на калибровке приборов и взаимной привязке данных, полученных на разных приборах. Все приборы имели устройства оперативной калибровки. Калибровка ПНС и СП была основана на использовании фторопластовых экранов, водимых в рабочий объем прибора. Прибор ФАН располагает штатным калибратором в виде рассеивающей призмы. Первоначально ПНС и СП калибровались по газам (ПНС) или дымам (СП) в абсолютных единицах  $\text{км}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . Призма ФАН имеет сертифицированную заводскую привязку.

Из регистрируемого сигнала исключался фон камеры и добавка, обусловленная молекулярным рассеянием. Фон камеры в приборе ФАН примерно равен вкладу молекулярного рассеяния. Фон СП оценивался по сигналу в чистом воздухе после его длительного отстоя в рабочей камере. Фон ПП определялся по сигналу в рабочей камере, заполненной фреоном с известными рассеивающими свойствами.

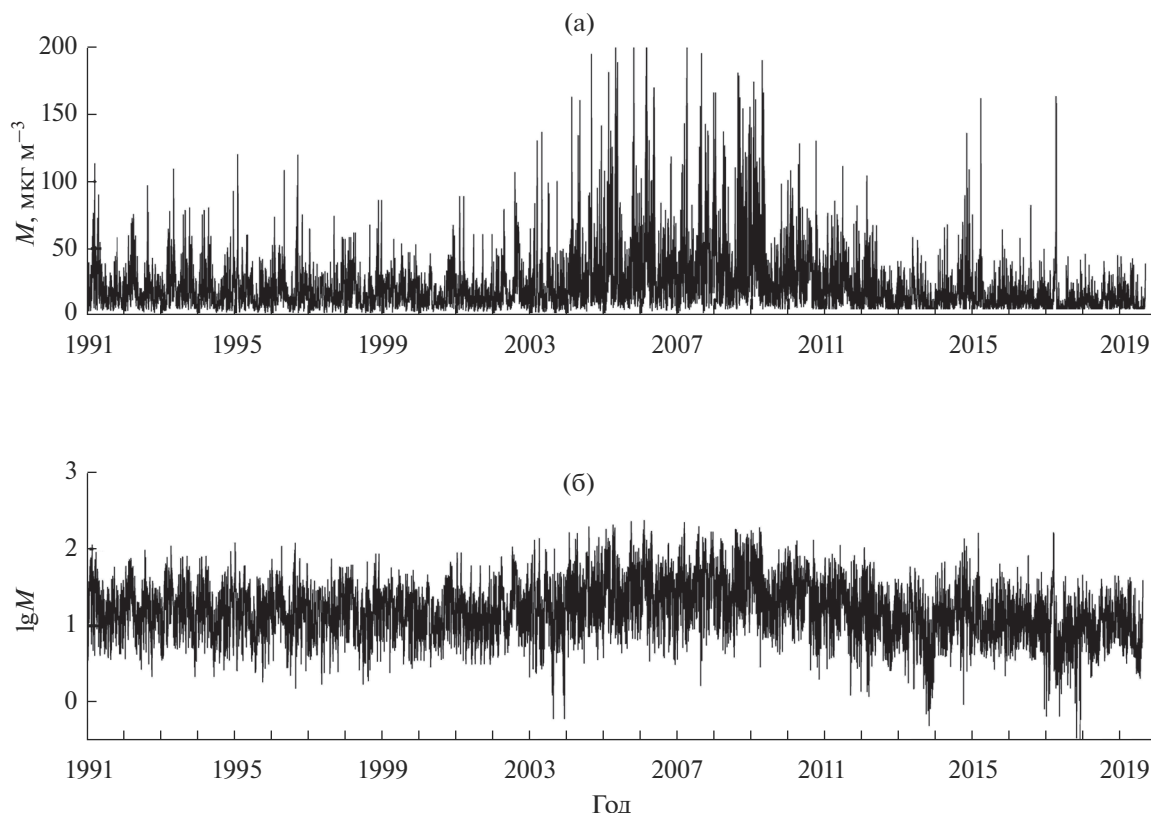


Рис. 2. Массовая концентрация аэрозоля (а) и ее десятичный логарифм (б).

Взаимная привязка данных, полученных на разных приборах, делалась в течение интервалов перекрытия 2001–2003 и 2012 гг. на основе регрессионных зависимостей. Многократно отбирались ситуации с большим, не менее одного порядка, размахом вариаций сигналов, регистрируемых синхронно работающими в течение 0.5–1 мес. приборами. Для них определялись коэффициенты корреляции и регрессии. Коэффициент корреляции между данными СП и ФАН составлял около единицы (0.98–0.99), коэффициент линейной регрессии тоже в среднем был близок к единице ( $1 \pm 0.05$ ). Корреляция между данными ПНС и СП была несколько хуже (0.93–0.95), возможно, из-за несовпадения положений приборов (разнос их воздухозаборников составлял около 30 м). Угловым коэффициентом регрессии был в основном в пределах  $0.95 \pm 0.05$ . Стандартное отклонение от прямой регрессии в первом случае составил 3–10%, во втором случае – 10–15%.

Поскольку угловые коэффициенты регрессии для обеих пар приборов близки к единице, перенормировка данных не делалась. Привязка осуществлялась путем смещения данных одного прибора относительно данных другого прибора на величину средних значений свободных членов соответствующих линейных регрессий. По

нашей оценке, рассогласованность данных всех трех приборов в процессе регистрации всего ряда не должна превышать 10–15%.

Значения массовой концентрации аэрозоля получены умножением измеренных под углом  $45^\circ$  коэффициентов направленного светорассеяния на коэффициент 2000. Это значение получено при сопоставлении наших данных с результатами измерений массовой концентрации аэрозоля фракции  $PM_{2.5}$  на poste Мосэкомониторинга, расположенном на ЗНС [8].

Ряд ежедневных значений массовой концентрации аэрозоля и ее десятичного логарифма приведен на рис. 2. Период 1991–2003 гг. представлен данными ПНС, 2004–2012 гг. – данными СП, а последующий период – данными ФАН. Особенности этих данных более подробно описаны в [8].

Визуальный анализ рис. 2 указывает на общее уменьшение концентрации аэрозоля на протяжении измерительного периода. Однако интервал с 2003 по 2012 г. резко выделяется на общем фоне. Ему свойственны частые сильные аномалии высоких значений концентрации аэрозоля, а общий ход концентрации в этот период можно характеризовать нарастанием в начале и уменьшением в конце периода. Рисунок 2б показывает, что этот ход можно аппроксимировать сочетанием линей-

ного и квадратичного трендов, причем вершина параболы (квадратичной функции – тренда) приходится примерно на середину периода.

В соответствии с рис. 2, полный период изменений разбивается на три интервала 1991–2002, 2003–2012 и 2013–2019 гг. В дальнейшем будем их для краткости называть периодами 1, 2 и 3 соответственно. Отметим, что данные измерений в интервалах 1 и 3 представлены данными, полученными на одном приборе, а смена прибора в течение интервала 2 приходится на начало интервала. Это, наряду с взаимной привязкой последовательных данных разных приборов, обеспечивает высокую степень однородности данных внутри каждого интервала.

### 3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для анализа в работе использованы значения логарифма концентрации аэрозоля, поскольку логарифм, в отличие от концентрации, достаточно хорошо соответствует гауссову распределению и для него можно применять соответствующий статистический аппарат. Аномалии концентрации аэрозоля в работе определяются следующим образом. Если значение логарифма концентрации превышает его среднее значение плюс  $1.6\sigma$ , где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение логарифма концентрации, то такая концентрация относится к аномально высокой. Аналогично, если значение логарифма концентрации ниже его среднего значения за вычетом  $1.6\sigma$ , то такая концентрация считается аномально низкой. Значение коэффициента 1.6 выбрано из соображений, чтобы высокие и низкие аномалии составили по 5% (в сумме – 10%) от общего числа значений концентрации [14].

Для анализа зависимости аномалий аэрозоля от направления атмосферного переноса привлечены данные реанализа ERA-Interim (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>) о зональной и меридиональной компонентах скорости ветра на изобарической поверхности 975 гПа (около 120 м над поверхность земли на ЗНС). Направления ветра мы разбили на восемь секторов с центрами, соответствующими основным румбам (северному, северо-восточному и т.д.).

Анализ трендов выполнен с помощью модели множественной линейной регрессии, которая в общем виде может быть записана как [15]:

$$Y = X\beta + \epsilon, \quad (1)$$

где  $Y$  – вектор наблюдений длины  $n$  (анализируемый ряд),  $X$  – матрица предикторов (независимых переменных) размера  $(n \times p)$ ,  $p$  – число предикторов,  $\beta$  – вектор неизвестных коэффициентов (искомых коэффициентов регрессии) длины  $p$ ,  $\epsilon$  – вектор ошибок (остатков) длины  $n$  (остаточ-

ный ряд). Если ряд ошибок  $\epsilon$  некоррелирован и подчиняется гауссову распределению, то ошибки искомым регрессионным коэффициентам найдутся при решении системы (1) стандартным методом наименьших квадратов. Однако если ряд  $\epsilon$  коррелирован, то необходимо внести поправки в ошибки коэффициентов регрессии [15]. В [16, 17] нами предложен метод учета автокорреляции остаточного ряда  $e$  в большом диапазоне временных масштабов. Остаточный ряд представляется в виде процесса авторегрессии, порядок которой может быть намного больше 1. Этот метод применялся для анализа аэрозольных данных [8, 9] и также использован в настоящей работе. Порядок авторегрессии в представлении остаточного ряда авторегрессионным процессом принят, в соответствии с [8], равным 400.

Регрессионная модель (1) применялась порознь для каждого из периодов 1, 2 и 3. В качестве зависимой переменной в модели использован логарифм концентрации аэрозоля. В этом случае ошибка регрессионного представления (остаточный ряд  $e$ ) удовлетворяет гауссову распределению [8], и для нее применим соответствующий аппарат оценивания статистической значимости регрессионных оценок [15].

В качестве предикторов (независимых переменных) в регрессионную модель включены свободный член, линейный по времени член (для описания линейного тренда), квадратичный член (для учета квадратичного тренда) и переменные, описывающие изменение направления ветра. Квадратичный член симметричен относительно середины анализируемого периода. Таким образом, он не влияет на значение линейного тренда. Его назначение – аппроксимировать нелинейный ход концентрации аэрозоля в 2003–2012 гг. Квадратичный тренд в регрессионной модели сохранен и при анализе данных за другие периоды (также с центрированием на середину соответствующего периода).

Направление ветра однозначно определяется значениями синуса и косинуса соответствующего ему угла (обозначим его  $\varphi$ ). Таким образом, временные ряды  $\sin\varphi(t)$  и  $\cos\varphi(t)$ , где  $t$  – время, служат независимыми переменными (столбцами матрицы предикторов в (1)). Соответствующие им регрессионные коэффициенты  $\beta$  характеризуют чувствительности логарифма концентрации аэрозоля к изменениям этих переменных. Поскольку сами переменные являются гармоническими функциями направления ветра, то значения их коэффициентов регрессии (пусть это  $\beta_s$  и  $\beta_c$ ) определяют направление ветра, для окрестности которого получены регрессионные (среднеквадратичные) оценки чувствительности. По ним можно определить направление ветра ( $\varphi_0$ ), с которым преимущественно связаны высокие значе-

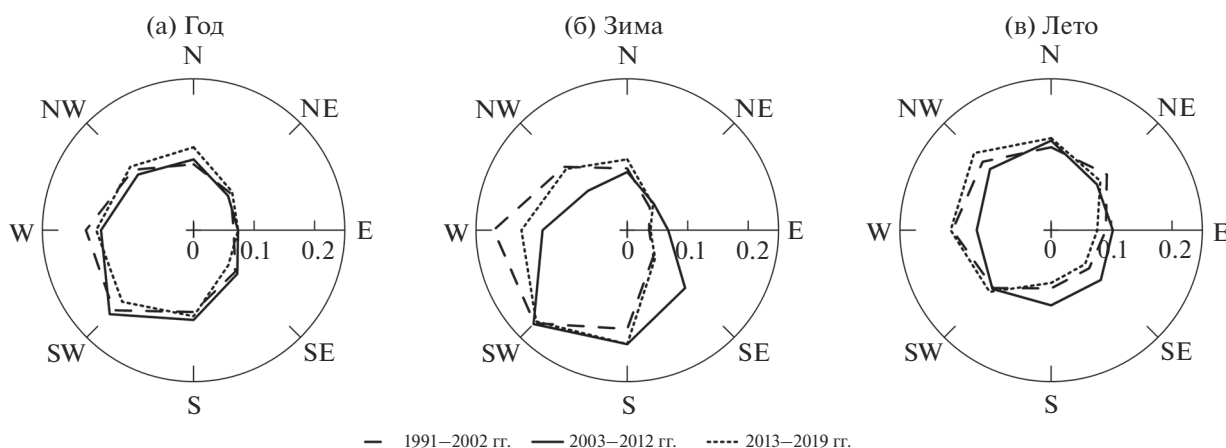


Рис. 3. Годовая (а), зимняя (б) и летняя (в) розы ветров для периодов 1991–2002 гг. (штриховые кривые), 2003–2012 гг. (сплошные кривые) и 2013–2019 гг. (пунктирные кривые).

ния концентрации аэрозоля. Тогда противоположное ему направление  $\varphi_n = \varphi_e + \pi$  способствует низким значениям концентрации. Вклад переноса в концентрацию аэрозоля наиболее существен при направлениях ветра  $\varphi_e$  и  $\varphi_n$ .

В рассмотренной простейшей зависимости концентрации аэрозоля от направления ветра высокие и низкие значения концентрации аэрозоля связываются с переносом с диаметрально противоположных направлений. Такое не всегда соответствует действительности. Поэтому мы дополнили независимые переменные рядами  $\sin 2\varphi(t)$ ,  $\cos 2\varphi(t)$  и  $\sin 3\varphi(t)$ ,  $\cos 3\varphi(t)$ . Их члены являются второй и третьей гармониками соответствующих членов двух рассмотренных перед этим рядов. Всем трем парам независимых переменных соответствуют свои регрессионные коэффициенты, определяемые при решении системы (1).

Направление переноса, при котором в основном наблюдается высокое содержание аэрозоля, определяется путем нахождения максимума функции  $\sum_n \{\sin(n\varphi) + \cos(n\varphi)\}$  при изменении угла  $\varphi$  в пределах от 0 до  $2\pi$ . Аналогично, направление переноса, при котором в основном наблюдается низкое содержание аэрозоля, определяется путем нахождения максимума модуля этой функции при отрицательном значении самой функции.

С целью учета годового хода аэрозоля, сезонной зависимости его трендов и сезонной зависимости эффектов переноса значения регрессионных коэффициентов  $\beta$  в (1) представлены в виде разложения в ряд Фурье по парам синус–косинус, соответствующим гармоникам годового хода. В разложении свободного члена использовано две гармоники: годовая и полугодовая. В разложении остальных коэффициентов использовано четыре гармоники. В итоге, число неизвестных коэффициентов в (1) составило 77.

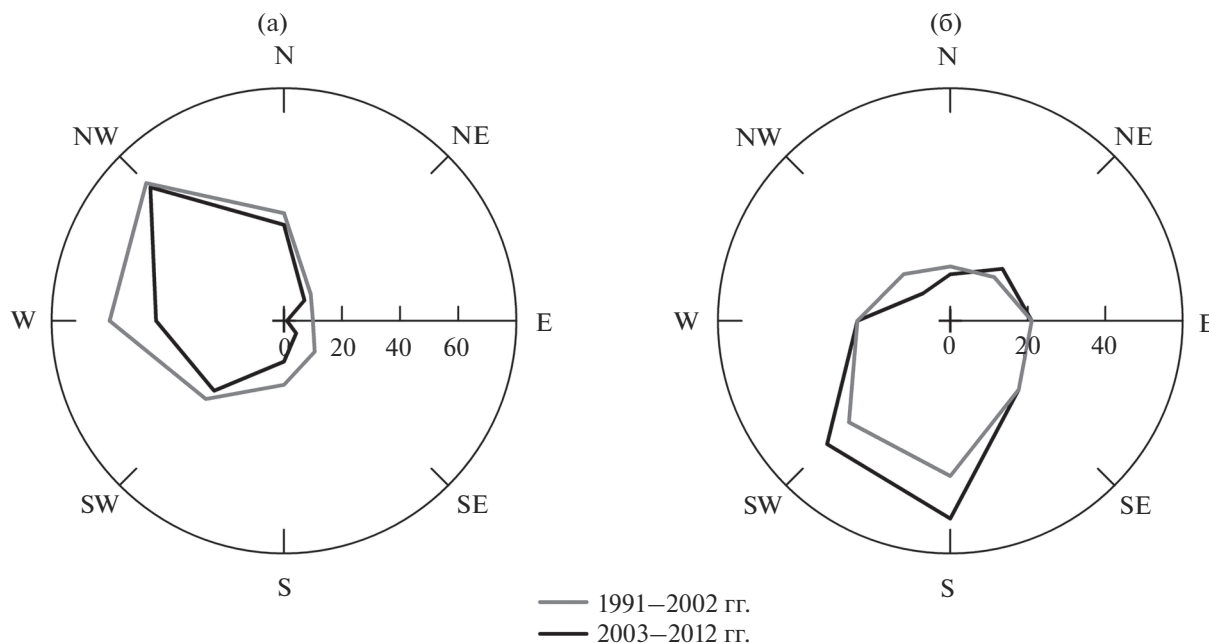
Этот вариант регрессионной модели использован для оценки зависимости концентрации аэрозоля от направления ветра.

Представленные далее оценки аэрозольных трендов получены с помощью более сложного варианта регрессионной модели. Можно предположить, что зависимость концентрации аэрозоля от направления ветра разная при разных значениях концентрации. Для учета такой возможности мы рассмотрели три градации концентрации аэрозоля: аномально низкие (по уровню 1.6 $\sigma$  для логарифма концентрации; см. выше), аномально высокие (по тому же критерию) и промежуточные. Значения независимых переменных, описывающих влияние направления ветра в пределах какой-либо градации (гармонических функций угла направления ветра), заменились нулями, если концентрация аэрозоля не принадлежала этой градации. Таким образом, все переменные, описывающие в модели (1) влияние направления ветра, взаимно ортогональны (независимы).

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 4.1. Вероятности аномалий

На рис. 3 представлены годовая, зимняя и летняя розы ветров (вероятности ветра основных румбов) на изобарической поверхности 975 гПа в окрестности ЗНС для периодов 1, 2 и 3. Розы ветров для периодов 1 и 3 в целом близки между собой. Годовая роза ветров для периода 2 близка к годовым розам ветров для двух других периодов (рис. 3а), но сезонные розы ветров для периода 2 отличаются от сезонных роз ветров для двух других периодов. Так, общей особенностью зимней и летней роз ветров в период 2 является уменьшение вероятности ветров западного и северо-западного направлений и увеличение вероятности



**Рис. 4.** Количество случаев низких (а) и высоких (б) значений концентрации аэрозоля в 1991–2002 гг. (серые кривые) и 2003–2012 гг. (черные кривые), связанных с переносом с различных направлений.

ветра юго-восточного направления по сравнению с периодами 1 и 3 (рис. 3а, 3б).

Последующий анализ мы в основном проведем на основе сопоставления результатов для периодов 1 и 2.

Рисунок 4 показывает распределение числа низких и высоких значений концентрации аэрозоля (по критерию  $1.6\sigma$ ) в течение периодов 1 и 2. Малая концентрация чаще наблюдалась при ветре северо-западного и западного румбов, а большая концентрация – при ветре юго-западного и южного румбов.

Сопоставление рис. 4а с 3а указывает на сильные различия распределений повторяемости ветра и повторяемости низких значений концентрации аэрозоля (последняя пропорциональна числу аномалий на рис. 4а). В то же время рис. 4б и 3а имеют общую особенность: повторяемость ветра и повторяемость высоких значений концентрации аэрозоля максимальны для южного и юго-западного направлений. При этом отметим, что количество случаев с высокой концентрацией при таких ветрах в период 2 заметно увеличилось (рис. 4б) при меньшей длительности этого периода наблюдений по сравнению с периодом 1, хотя повторяемости ветра для двух периодов примерно одинаковы (рис. 3).

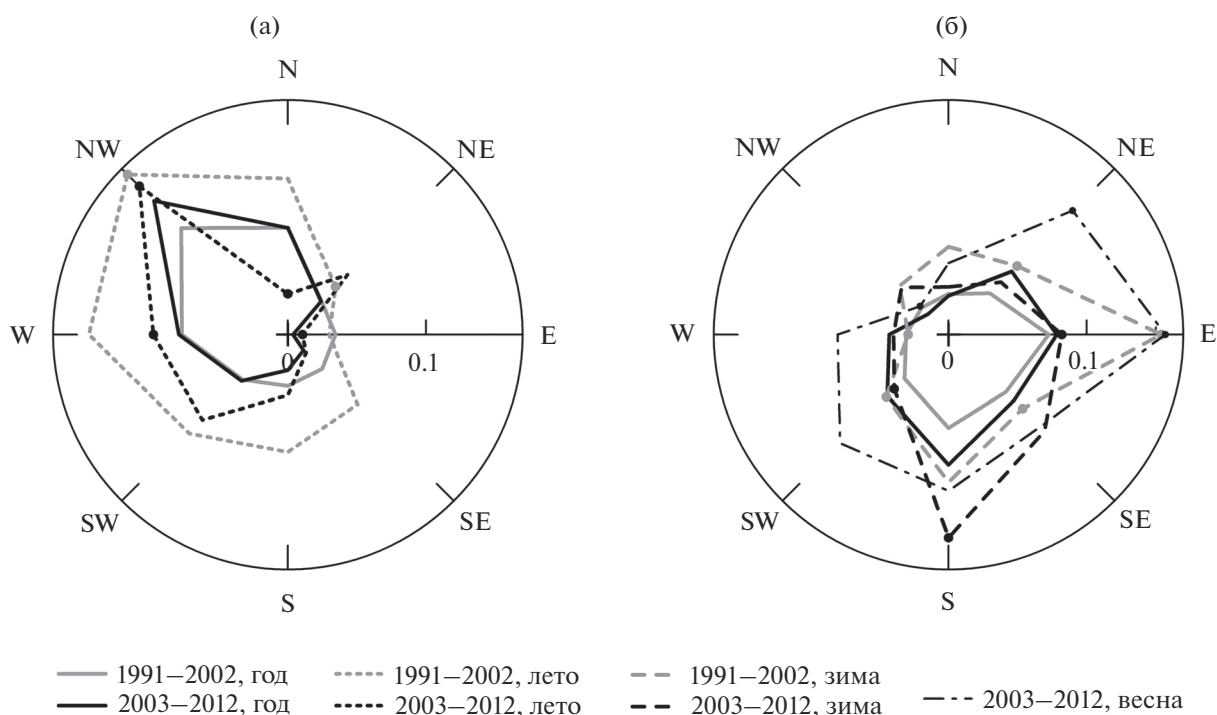
Для выявления направлений ветра, с которыми связаны аномально высокие или аномально низкие значения концентрации аэрозоля, выполнен дополнительный анализ. Рисунок 5а показывает вероятность низких, а рис. 5б – вероятность

высоких значений концентрации в зависимости от направления ветра в периоды 1 и 2 зимой, весной (только для периода 2), летом и в целом за год. Чтобы не перегружать рисунки, на рис. 5а приведены летние распределения, а на рис. 5б – зимние. Для этих сезонов получены наибольшие вероятности низких и высоких концентраций аэрозоля соответственно (при определенных направлениях ветра).

Согласно диаграммам на рис. 5а, малое содержание аэрозоля с наибольшей вероятностью наблюдается при ветре северо-западного направления, а летом – в течение периода 1 и при западном ветре. В этих случаях вероятность аномально низких значений концентрации аэрозоля на ЗНС (по критерию  $1.6\sigma$ ) составляет около 15%. Вероятность низких значений концентрации в летние сезоны периода 1 достаточно велика (около 10%) и для большинства других направлений ветра. Для летних сезонов периода 2 диаграмма вероятности более узкая. Аномально низкие значения концентрации аэрозоля можно ожидать в основном при ветре с западной составляющей.

Важная особенность распределений на рис. 5а состоит в том, что вероятность аномально низких концентраций аэрозоля при восточном ветре мала, а в течение периода 2 близка к нулю.

Аномально высокие концентрации аэрозоля зимой на ЗНС наиболее вероятны при ветрах восточного, южного и юго-восточного направлений (рис. 5б). Диаграммы вероятностей для зимних сезонов 1-го и 2-го периодов существенно различаются. Наибольшая вероятность высоких



**Рис. 5.** Вероятность низких (а) и высоких (б) значений концентрации аэрозоля в зависимости от направления ветра в 1991–2002 гг. (серый цвет) и 2003–2012 гг. (черный цвет) зимой (штриховые кривые), летом (пунктир), весной (штрихпунктир) и в целом за год (сплошные кривые). Точки на сезонных кривых указывают на 90% статистическую достоверность соответствующего значения.

аномалий (15%) в 2003–2012 гг. была связана с южным ветром, а в 1991–2002 гг. — с восточным ветром, хотя южное направление ветра в этот период также довольно часто (с вероятностью 10%) сопровождалось аномалиями концентрации. При всем этом подчеркнем, что вероятность высоких аномалий при юго-западном ветре в течение обоих периодов не мала (около 5%) и, в сочетании с вытянутой в этом направлении розой ветров (рис. 3а, 3б), обеспечивает большое количество аномальных значений (рис. 4б).

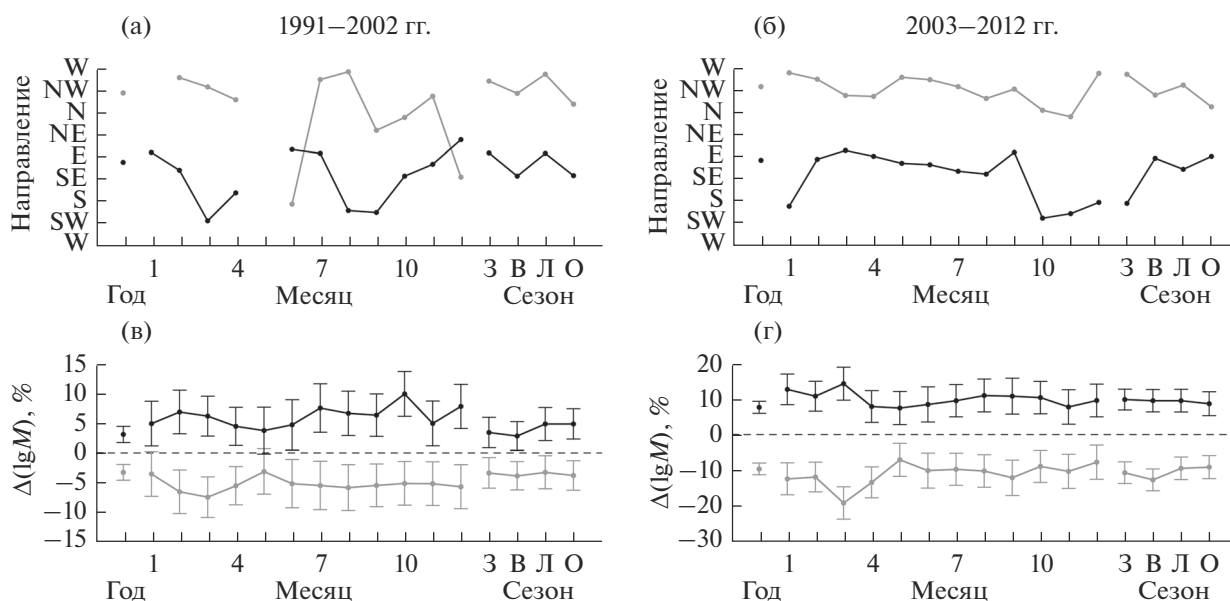
Необходимо отметить, что в весенние сезоны 2003–2012 гг. сектор направлений ветра, с которыми связаны высокие концентрации аэрозоля, значительно шире (штрихпунктирная кривая на рис. 5б). Он включает практически все направления, кроме северо-западного, а большая вероятность (свыше 10%) аномально высоких концентраций отмечена при северо-восточном, восточном, южном и юго-западном ветрах. Это указывает на то, что источник большой концентрации аэрозоля в этот период не локализован по направлению ветра. Источники были, вероятно, рассредоточены в регионе.

#### 4.2. Результаты регрессионного анализа

Включение в регрессионную модель предикторов, учитывающих влияние на аэрозоль на-

правления ветра, позволило, во-первых, оценить вклад вариаций направления ветра в изменчивость аэрозоля и определить направление ветра с максимальным влиянием на содержание аэрозоля. Во-вторых, это привело к уменьшению ошибок аэрозольных трендов и позволило получить статистически значимые оценки трендов не только для периодов 1 и 3, но и для периода 2003–2012 гг. с аномально высокими значениями концентрации аэрозоля на ЗНС.

**4.2.1. Эффекты переноса.** Рисунки 6а, 6б показывают направления ветра, с которыми связаны низкие и высокие значения концентрации аэрозоля в зависимости от месяца, сезона и в целом за год для первого и второго периодов измерений. Сразу отметим вполне хорошее соответствие сезонных и годовых оценок направления ветра результатам анализа, представленным выше. Например, большие концентрации аэрозоля зимой в период 1 связаны главным образом с восточным ветром (черная кривая на рис. 6а), а в период 2 — с южным ветром (черная кривая на рис. 6б), что соответствует зимним диаграммам на рис. 5б. Другие сезонные оценки направлений ветра на рис. 6, включая весенние и осенние оценки, тоже соответствуют результатам, полученным при анализе диаграмм вероятностей в разделе 4.1 (на рис. 5 приведена только часть этих результатов). При сопоставлении результатов следует, однако, иметь в



**Рис. 6.** (а, б) – Годовая (точки в левых частях рисунков), месячные (кривые в средних частях рисунков) и сезонные (кривые в правых частях рисунков) оценки направлений ветра, с которыми связаны низкие (показано серым цветом) и высокие (показано черным цветом) значения концентрации аэрозоля для периодов 1991–2002 гг. (а) и 2003–2012 гг. (б). Приведены только значения, соответствующие статистически значимым оценкам на графиках (в, г). (в, г) – Соответствующие им оценки приращений логарифма концентрации аэрозоля  $lgM$  в процентах относительно среднего значения  $lgM$ . Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы.

виду, что диаграммы на рис. 5 отражают аномально низкие и высокие (по критерию  $1.6\sigma$ ) значения концентрации, а результаты, представленные на рис. 6, получены по всей совокупности аэрозольных данных.

Помесячное распределение направления ветра, представленное серой кривой на рис. 6а, для периода 1 говорит о том, что направления ветра, с которыми связано малое содержание аэрозоля, в течение года сильно варьировало. По контрасту с этим низкое содержание аэрозоля в период 2 наблюдалось в основном при ветре из сектора, заключенного между северным и западным направлениями (серая кривая на рис. 6б). Эта особенность, однако, свойственна не только периоду 2. В последующий за ним период 3 направление, с которым связаны малые концентрации аэрозоля, еще меньше варьирует в течение года вблизи северо-западного направления (соответствующий рисунок не приводим).

Сопоставляя помесечные распределения этих зависимостей для трех последовательных периодов, мы видим, что условия, сопутствующие низким значениям приземного содержания аэрозоля на ЗНС, изменялись в течение примерно 30-летнего периода измерений. В итоге сектор направлений переноса, вызывающего уменьшение концентрации аэрозоля, существенно сузился до преимущественно северо-западного румба. Причем, согласно оценкам линейных трендов (см. ниже, а

также [8, 9]), это сопровождалось долговременным уменьшением концентрации аэрозоля.

Черная кривая на рис. 6а показывает, что направление ветра, способствующее большому содержанию аэрозоля, варьировало в течение года в период 1 в широком секторе от юго-западного до (против часовой стрелки) северо-восточного направлений, в сумме охватывающем полукруг. В этом же широком секторе заключены вариации направления ветра, способствующего большому содержанию аэрозоля, в период 3 (рисунок не приводится). Общей для этих двух периодов особенностью помесечных распределений служит изменение направления весной от восточного (для периода 3 – от северо-восточного) румба к юго-западному румбу с последующим возвратом к прежнему направлению.

Сектор направлений ветра, способствующих высокому содержанию аэрозоля в период 2 в целом уже, чем в периоды 1 и 3 (рис. 6б). При этом выделяются два направления. С октября по январь высокие значения концентрации аэрозоля преимущественно связаны с ветрами с преобладанием южной компоненты, а в остальное время года – с ветрами с преобладанием восточной компоненты.

Таким образом, высокие и низкие значения концентрации аэрозоля на ЗНС в 2003–2012 гг. связаны, если рассматривать полный массив аэрозольных данных, с отдельными направлени-



ями ветра. Но мы должны иметь в виду, что зависимость аномально высоких значений концентрации (по критерию  $1.6\sigma$ ) от направления ветра может быть более сложной (см. весеннюю диаграмму на рис. 5б).

На рис. 6в, 6г приведены среднестатистические оценки приращений логарифма концентрации аэрозоля (по отношению к среднему значению логарифма) при направлениях ветра, представленных на рис. 6а, 6б. Оценка увеличения логарифма концентрации за счет переноса с этих направлений в период 1 варьирует в течение года в основном в окрестности 5% (рис. 6в). Такой же порядок величины составляет уменьшение логарифма концентрации при соответствующих направлениях ветра. Увеличение и уменьшение логарифма концентрации в период 2 примерно в два раза больше, чем в период 1 (рис. 6г). Таким образом, вклад изменений направления ветра в вариации логарифма концентрации в среднем за месяц составляет обычно порядка 10% в период 1 и порядка 20% в период 2. Таким вкладом не стоит пренебрегать при анализе трендов аэрозоля.

**4.2.2. Линейные тренды.** На рис. 7 приведены оценки линейных трендов для трех периодов, полученные с учетом (черные кривые и точки) и без учета (серые кривые и точки) направления ветра. Учет изменений направления ветра в регрессионной модели в целом незначительно повлиял на величину трендов, за исключением оценок трендов в отдельные месяцы. Однако он привел к существенному уменьшению доверительных интервалов (к повышению статистической достоверности) трендов. Слабое влияние изменений направления ветра на значения трендов указывает на то, что в пределах каждого из периодов не было заметных тенденций изменения атмосферного переноса, которые бы внесли вклад в линейные тренды аэрозоля.

Пунктирной кривой на рис. 7а показаны оценки тренда из работы [9]. Расхождение зимних оценок связано с тем, что в [8, 9] учитывалось влияние на содержание аэрозоля Североатлантического колебания (САК). Зимние значения индекса САК в период 1 имеют трендовую составляющую, и это отразилось на зимних оценках аэрозольного тренда в [8, 9] через связь концентрации аэрозоля с индексом САК на меньших временных масштабах.

Согласно рис. 7, для всех трех периодов получены отрицательные годовые оценки трендов аэрозоля. Линейный по логарифму концентрации тренд составил около  $-0.7$  и  $-0.6\%$  в год в течение периодов 1 и 2 соответственно и  $-2.7\%$  в год в течение периода 3.

Годовые вариации месячных оценок трендов для периодов 1 и 2 имеют общие особенности: отрицательные значения трендов в зимне-весенний

сезон, отсутствие тренда летом, отрицательный тренд осенью (статистически незначимый в период 1), изменение знака тренда в конце осени до положительного значения тренда в начале зимы (статистически незначимого в период 1). Отдельные фрагменты этой зависимости свойственны и периоду 3. Так, локальные экстремумы отрицательных месячных трендов в феврале и октябре присутствуют на всех трех графиках рис. 7.

Отметим другие общие особенности линейных трендов в периоды 1 и 2. Экстремальные значения месячных оценок составляют около  $-2\%$  в год для обоих периодов (в январе–феврале в период 1 и в сентябре–октябре в период 2). Для обоих периодов получены отрицательные, статистически значимые, зимние и весенние оценки трендов. При этом тренды в период 1 примерно вдвое сильнее.

Отличительной особенностью периода 2 по сравнению с периодом 1 является наличие статистически значимого тренда осенью (рис. 7б). Из четырех сезонных оценок трендов для периода 2 три оценки (исключая летнюю) статистически значимы.

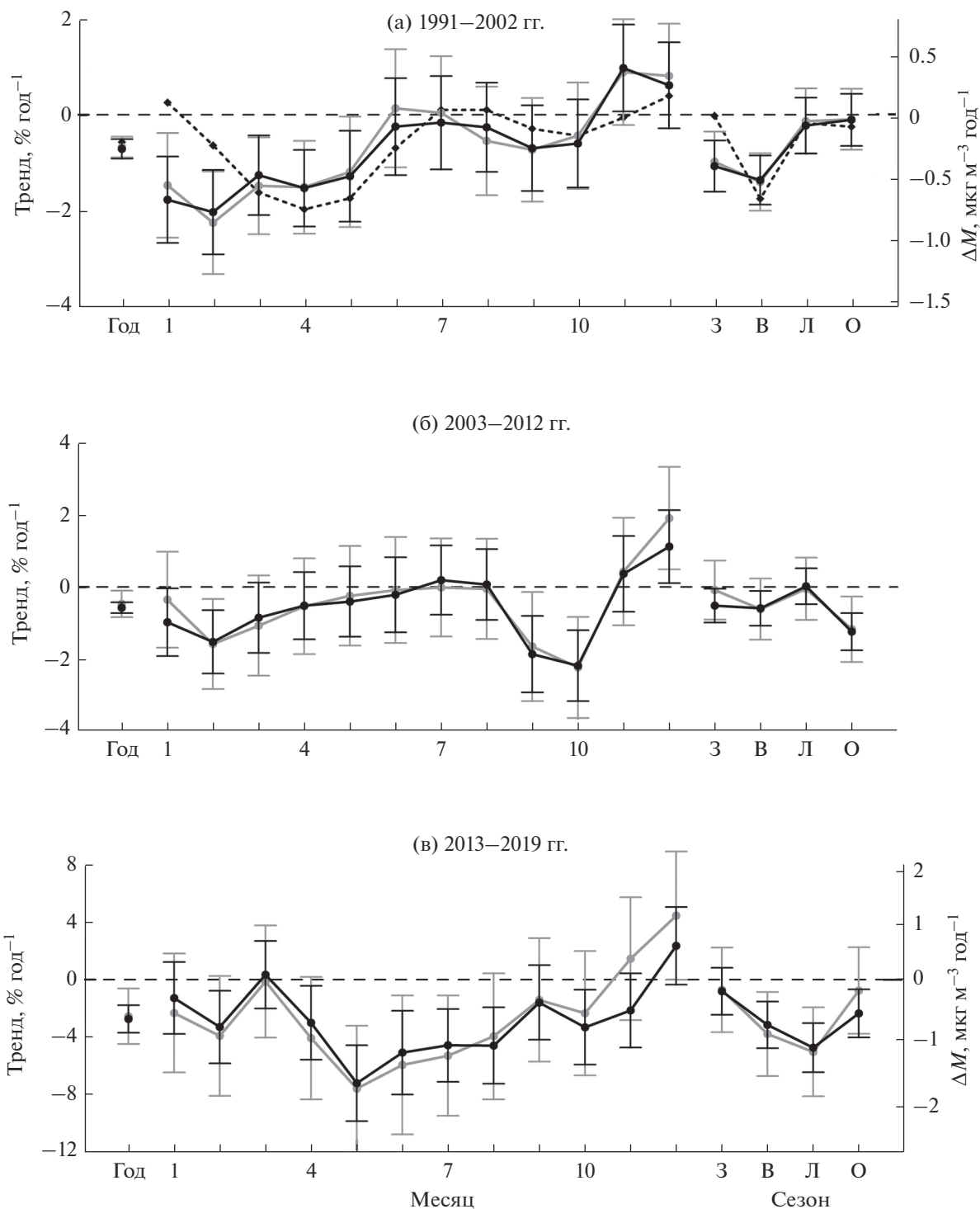
Основная особенность периода 3 – отрицательный тренд аэрозоля в конце весны и летом (рис. 7в). Он обсуждался в [8, 9] и предположительно связан с уменьшением летних значений приземной температуры в регионе [9]. Однако для количественной оценки вклада температуры в аэрозольные тренды требуется специальный анализ.

Большие (по модулю) значения тренда в период 3, выраженные в процентах, частично обусловлены меньшими значениями средней концентрации аэрозоля и ее логарифма после 2012 г. по сравнению с предшествующим 20-летним периодом (рис. 2). На правых вертикальных осях рис. 7а, 7в приведены годовые изменения концентрации аэрозоля в абсолютных единицах, соответствующие значениям линейного тренда логарифма концентрации, отложенным по левым осям. Различия в изменениях концентрации не столь велики. В частности, изменения концентрации для февралей 1-го и 3-го периодов (то есть в аналогичных экстремумах соответствующих кривых) имеют один порядок величины.

Общая для периодов 2 и 3 особенность – статистически значимые осенние оценки трендов.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В работе исследована зависимость аномалий массовой концентрации аэрозоля в приземном слое атмосферы на Звенигородской научной станции от направления ветра на верхней границе приземного слоя ( $\sim 120$  м). Рассмотрены три последо-



**Рис. 7.** Годовая, месячные и сезонные оценки линейного тренда логарифма концентрации аэрозоля и их 95% доверительные интервалы в 1991–2002 (а), 2002–2012 гг. (б) и 2013–2019 гг. (в). Правые вертикальные оси показывают соответствующие трендам изменения концентрации аэрозоля. Сплошные черные кривые соответствуют оценкам, полученным с учетом, а сплошные серые кривые – без учета направления ветра. Пунктирные кривые – оценки, полученные в [9]. Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы.

вательных периода, существенно различающихся содержанием и изменчивостью аэрозоля и составляющих в сумме почти 30-летний непрерывный ряд аэрозольных измерений с 1991 по 2019 г.

Определены отдельные направления или секторы направлений ветра, с наибольшей вероятностью способствующие низким и высоким значениям концентрации аэрозоля. Эти направления

варьируют в течение года. Низкое содержание аэрозоля чаще связано с ветром северо-западного румба. Высокое содержание в большей степени связано с ветром, имеющим восточную и/или южную компоненты. Эти направления ориентированы в сторону Москвы и на близко расположенные автомагистрали (рис. 1). Однако такое соседство нельзя рассматривать в качестве основной причины аномалий с высоким содержанием аэрозоля, поскольку период особо сильных аномалий (2003–2012 гг.) не был исключительным по интенсивности автомобильного движения по сравнению с последующим периодом.

Анализ вероятности высоких аномалий в зависимости от направления ветра (рис. 4б, 5б, 6б), с одной стороны, выявил особенности периода 2003–2012 гг., но, с другой стороны, не позволяет на данном этапе сделать определенный вывод о возможной причине необычно сильных аномалий в этот период. В частности, зимняя диаграмма вероятности для этого периода на рис. 5б указывает на южное направление как направление на потенциальный источник аномалий. Однако весенняя диаграмма говорит о том, что источник рассредоточен по направлениям. Это противоречие трудно разрешимо, если предположить, что источник (источники) аномалий находился в окрестности московского мегаполиса.

Направление ветра в пункте измерений не может в полной мере характеризовать траекторию переноса аэрозоля в этот пункт. Можно предположить, что необычно сильные аномалии аэрозоля в 2003–2012 гг. связаны с более удаленным районом (районами) и проявились в аэрозольных данных на ЗНС благодаря изменению крупномасштабной конфигурации атмосферного переноса. Возможно, это изменение отразилось локально в розе ветров в этот период (рис. 3б, 3в). Другой причиной необычных аномалий могло бы быть изменение местных (региональных) условий формирования аэрозольных частиц, приводящее к росту массовой концентрации аэрозоля, например, к образованию оптических дымок. Оба эти предположительных механизма могут действовать одновременно и быть следствием климатической изменчивости.

Для идентификации регионов-источников аэрозольных аномалий можно дополнительно привлекать траекторные методы анализа [18]. Большую пользу могли бы принести химико-транспортные модели.

Учет влияния направления ветра на содержание аэрозоля позволил получить оценки аэрозольных трендов на протяжении всего периода аэрозольных измерений на ЗНС. Годовые оценки линейных трендов отрицательны для всех трех выделенных периодов измерений (1991–2002, 2003–2012 и 2013–2019 гг.). Месячные оценки

трендов для всех периодов в основном отрицательны или близки к нулю, за исключением декабря, для которого выявлен многолетний рост концентрации аэрозоля. Общими для трех периодов особенностями годового хода месячных оценок являются отрицательные тренды в конце зимы (февраль) и середине осени (осенний тренд статистически незначим в 1-й период).

Экстремальные отрицательные значения месячных оценок трендов близки в периоды 1 и 2 (–2% в год), но значительно больше (по модулю) в период 3. Основная особенность периода 3 – сильный отрицательный тренд аэрозоля в конце весны и летом. Его интерпретация требует, на наш взгляд, учета изменений температуры.

Статистически значимые сезонные оценки линейных трендов с учетом вариаций направления ветра получены для зимы и весны периода 1, зимы, весны и осени периода 2, весны, лета и осени периода 3.

Анализ трендов показал, что массовая концентрация приземного аэрозоля в западном Подмосковье за последние 30 лет в целом уменьшилась, хотя уменьшение было неравномерным.

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ивлев Л.С.* Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Ленинград: Изд. Ленинградского университета, 1982. 366 с.
2. *Prospero J.M., Charlson R.J., Mohnen V., Jaenicke R., Delany A.C., Moyers J., Zoller W., Rahn K.* The atmospheric aerosol system: An overview // *Rev. Geophys.* 1983. V. 21. № 7. P. 1607–1629
3. *Atmospheric aerosols: Life cycles and effects on air quality and climate / Eds. C. Tomasi, S. Fuzzi, A. Kokhanovsky.* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. 690 p.
4. *Hatzianastassiou N., Gkikas A., Mihalopoulos I.N., Torres O., Katsoulis B.D.* Natural versus anthropogenic aerosols in the eastern Mediterranean basin derived from multiyear TOMS and MODIS satellite data // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D24202.
5. *Chazette P., Raut J.-C., Dulac F., Berthier I.S., Kim S.-W., Royer P., Sanak J., Loaëc S., Grigaut-Desbrosses H.* Simultaneous observations of lower tropospheric continental aerosols with a ground-based, an airborne, and the spaceborne CALIOP lidar system // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. D00H31.
6. *Taylor M., Kazadzis S., Amiridis V., Kahn R.A.* Global aerosol mixtures and their multiyear and seasonal characteristics // *Atmos. Environ.* 2015. V. 116. P. 112–129.
7. *Liu Y., Zhu Q., Wang R., Xiao K., Cha P.* Distribution, source and transport of the aerosols over Central Asia // *Atmos. Environ.* 2019. V. 210. P. 120–131.
8. *Груздев А.Н., Исаков А.А., Аникин П.П.* Многолетние тренды массовой концентрации приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции Ин-

- ститута физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 12. С. 957–964.
9. *Gruzdev A.N., Isakov A.A., Anikin P.P.* Long-term trends in the mass concentration of near-surface aerosol at Zvenigorod Scientific Station of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS from 1991–2019 measurements // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2020. V. 606. 012017. P. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012017>.
  10. *Сидоров В.Н.* Сезонный и суточный ход содержания сухой фракции субмикронного аэрозоля в приземном слое // Труды конференции “Физика атмосферного аэрозоля”, Москва, 1999. С. 356–367.
  11. *Исаков А.А., Бегунов С.Л., Головятинский С.А., Тихонов А.В.* Спектрополяриметрические исследования натурального аэрозоля. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 556–561.
  12. *Исаков А.А., Груздев А.Н., Тихонов А.В.* О долгопериодных вариациях оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 393–399.
  13. *Исаков А.А., Груздев А.Н.* Долгопериодные вариации оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 2. С. 245–254.
  14. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных. Москва: Мир, 1989. 540 с. (перевод с: *Bendat J.S., Piersol A.G.* Random data: Analysis and measurement procedures. New York: John Wiley & Sons, 1986)
  15. *Draper N.R., Smith H* Applied regression analysis. New York: John Wiley & Sons, 1998. 705 p.
  16. *Груздев А.Н.* Учет автокорреляции в задаче линейной регрессии на примере анализа общего содержания NO<sub>2</sub> в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 73–82.
  17. *Gruzdev A.N.* Accounting for long-term serial correlation in a linear regression problem // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012020. P. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/231/1/012020>
  18. *Shukurov K.A., Postlyakov O.V., Borovski A.N., Shukurova L.M., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Savinykh V.V., Mokhov I.I., Semenov V.A., Chkhetiani O.G., Senik I.A.* Study of transport of atmospheric admixtures and temperature anomalies using trajectory methods at the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012048. P. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/231/1/012048>

## Anomalies and Trends in the Mass Concentration of Near-Surface Aerosol in the Western Part of Moscow Region

A. N. Gruzdev<sup>1,\*</sup> and A. A. Isakov<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia*

\*e-mail: [a.n.gruzdev@mail.ru](mailto:a.n.gruzdev@mail.ru)

\*\*e-mail: [a.a.isakov@mail.ru](mailto:a.a.isakov@mail.ru)

Results of analysis of anomalies and long-term trends in the mass concentration of near-surface aerosol at the Zvenigorod Scientific Station of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics according to measurements in 1991–2019 are presented. The analysis was performed taking into account the dependence of the aerosol concentration on the wind direction. Three consecutive periods with significantly different aerosol content and variability are considered: 1991–2002, 2003–2012, and 2013–2019. The second period is characterized by frequent and especially strong anomalies of high aerosol concentrations. The individual wind directions and wind direction sectors that are most likely to contribute to low and high aerosol concentrations are determined. For all the three periods, estimates of linear aerosol trends have been obtained, which differ in the magnitude and annual variation. Statistically significant seasonal trend estimates have been obtained for winter and spring of period 1, winter, spring and autumn of period 2, and spring, summer and autumn of period 3. Annual trend estimates are negative for all the periods. The mass concentration of near-surface aerosol has generally decreased over the past 30 years, although the decrease was nonuniform.

**Keywords:** aerosol, mass concentration, trend, anomalies