

**ГЕОЭКОЛОГИЯ***В.Н. Боков, В.Н. Воробьев, Е.В. Сарвинова***ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЕТРА НА ВНУТРИГОДОВОЕ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ  
В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ***V.N. Bokov, V.N. Vorobyev, E.V. Sarvirova***THE AFFECT OF WIND VARIABILITY ON INTERSEASONAL  
DISTRIBUTION OF ATMOSPHERIC ADDITIVES  
IN ST. PETERSBURG**

*В отличие от ранних исследований влияния ветра на загрязнение атмосферного воздуха города, когда использовались скалярные характеристики ветра, в работе представлен новый подход к анализу влияния ветра на изменчивость атмосферных примесей.*

*Ветер рассматривается как векторный случайный процесс, что позволило, анализируя векторные параметры ветра и измеренные значения атмосферных примесей, точнее определить причины образования значительных концентраций примесей. Векторные параметры ветра позволяют объяснить появление максимумов примесей, которые или образованы локальными источниками выбросов, или связаны с трансграничным переносом.*

*Unlike the early research of the influence of wind on impurities of the free air of the city, where the scalar characteristics of wind were used, a new approach to the analysis of wind impact on variability of atmospheric additives is shown in this article.*

*The wind is considered as a vectorial stochastic process that has allowed defining the reasons of formation of considerable impurity concentrations more precisely by analyzing the vectorial parameters of wind and measuring the values of atmospheric impurity. The vectorial parameters of the wind allow explaining the occurrence of maxima of additives, which are either formed by the local emission sources or are connected with transboundary transport.*

Изучение и оценка изменчивости концентрации атмосферных примесей в крупных городах и мегаполисах необходимы для принятия управленческих мер по снижению вреда здоровью населения [Потапов, 2002; Экологическая..., 2004]. С этой целью следует тщательно изучить основные пространственно-временные закономерности изменчивости распределения примесей в зависимости от функционирования источников выбросов и метеорологических условий в различных диапазонах изменчивости. По современным оценкам около 75–80 % изменчивости находящихся в атмосферном воздухе приме-

сей определяются метеорологическими условиями. Это объясняется тем, что стационарные источники выбросов (предприятия, энергоотопительные системы и т.п.) имеют утвержденные нормы и лимиты по выбросам примесей в атмосферу. На этом основании можно предполагать, что в Санкт-Петербурге выбросы в атмосферу имеют квазистационарный характер. Несколько сложнее оценить влияние автотранспорта, но с учетом выделения межгодового тренда [Боков, 1994], обусловленного ростом количества автомобильного транспорта, их выбросы в атмосферу можно оценить тоже как квазистационарные.

В предположении о квазистационарности и регулируемости источников выбросов роль метеорологических факторов в общей изменчивости загрязнения города и особенно в возникновении экстремумов существенно возрастает. Для исследования загрязнения города необходимо выделить и определить вклад метеорологических факторов (ветра, туманов, инверсий температуры воздуха).

Поскольку влияние ветра на уровень загрязнения воздуха является преобладающим, то данная статья посвящается анализу только внутригодовой изменчивости ветра и его влияния на примеси.

В ранних исследованиях влияния ветра на загрязнение атмосферного воздуха города использовались скалярные характеристики ветра, т.е. модуль скорости ветра и его направление (два параметра), которые анализировались отдельно друг от друга [Сонькин, 1991]. Это привело к поверхностным результатам экологических исследований. Поскольку ветер является векторной величиной, то временной ряд измерений ветра следует рассматривать как векторный случайный процесс. В этом случае рекомендуется [Боков, 1987, 1989, 1994; Методическое письмо..., 1984] использовать пять параметров ветра, что позволяет более полно отразить его закономерности. Они наилучшим образом отражают динамику перемещения воздушных масс, их изменчивость и соответственно условия и величину загрязнения атмосферы.

Для анализа векторных характеристик достаточно рассмотреть математическое ожидание [Методическое письмо..., 1984]:

$$\bar{m}_v = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{V}(t) dt, \quad (1)$$

дисперсию:

$$D_v = \frac{1}{T-1} \int_0^T [\vec{V}(t) - \bar{m}_v(t)]^2 dt \quad (2)$$

и связанные с ними характеристики, важнейшими из которых являются главные оси рассеяния  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ :

$$\lambda_{1,2} = 0,5 [D_{vx} + D_{vy} \pm \sqrt{(D_{vx} - D_{vy}) + (2D_{v_x v_y})}], \quad (3)$$

ориентация  $\alpha^0$  осей  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  относительно географической системы координат:

$$\alpha^0 = 0,5 \arctg[2V_x V_y / (D_{vx} - D_{vy})], \quad (4)$$

ориентация  $\varphi^0$  вектора  $\mathbf{m}_v$  относительно географических координат:

$$\varphi^0 = \arctg(m_{vx} / m_{vy}). \quad (5)$$

Величины  $\sqrt{\lambda_1}$  и  $\sqrt{\lambda_2}$  имеют ту же размерность, что и скорость ветра и характеризуют среднеквадратический разброс данных.

Среди инвариантов тензора для данной задачи представляют интерес

$$\sqrt{I_1} = \sqrt{\lambda_1} + \sqrt{\lambda_2}, \quad (6)$$

где  $\sqrt{I_1}$  характеризует общую интенсивность процесса

$$\text{и} \quad \mathbf{r} = \sqrt{I_1} / \mathbf{m}_v \quad (7)$$

– характеризует устойчивость процесса.

Чаще вместо тензора дисперсии  $D_v(t)$  используется эллипс среднего квадратического отклонения (С.К.О.)  $\sigma_v$  вектора ветра  $V_v$ , а инвариант  $\sqrt{I_1}$  отождествляют с оценкой горизонтальной макротурбулентности [Боков, 1987, 1989]. Анализ влияния векторных параметров ветра на внутригодовую изменчивость атмосферных примесей подразумевает интерпретацию двух воздушных потоков. Первый – это средний перенос воздуха  $\mathbf{m}_v$ ,  $\varphi^0$ . При этом предполагается, что в течение рассматриваемого интервала времени частица примеси может переноситься аналогично броуновскому движению, но средний вектор математического ожидания  $\mathbf{m}_v$  определяет скорость и направление потока  $\varphi^0$ , с которым данная частица перемещается (аналог результирующей скорости ветра) в течение месяца. Для мегаполисов с большим числом источников выбросов и большим значением параметра «шероховатости» средний поток характеризует содержание примесей, «произведенных» самим мегаполисом. В основном это относится к городам, для которых роза ветров имеет вид, близкий к окружности. Изменчивость среднего потока или его переменная часть – это второй поток. Он отражается через эллипс рассеяния вектора ветра за данный интервал времени, в нашем случае – за месяц. При этом главная ось среднего квадратического отклонения  $\sqrt{\lambda_1}$  показывает ориентацию  $\alpha^0$  максимальных скоростей ветра [Боков, 1987, 1989; Методическое письмо..., 1984], обусловленных атмосферными вихрями, которые в течение месяца могут проходить через город достаточно часто. При этом эти вихри, как правило, связаны с трансграничным переносом примесей. Напомним, что качественно оценить вклад средней (первый поток) или переменной (второй поток) воздушных частей в общую концентрацию примесей помогает инвариант устойчивости потока  $\mathbf{r}$  (7). Данное соотношение показывает, что при больших значениях  $\mathbf{r}$  доля «приносимых» трансграничным переносом примесей может

увеличить величину общей примеси или даже превзойти концентрацию среднего потока. И наоборот, когда значение  $r$  мало, то основной вклад в величину примеси вносит средний поток.

Рассмотрим возможности анализа представленных векторных параметров ветра с оценкой их влияния на атмосферные примеси на примере двух последующих лет – 1986 и 1987 гг. Данные годы выбраны случайным образом, а в качестве исходных значений атмосферных примесей использованы данные СЗУГМС, опубликованные в ежегодниках [Ежегодник загрязнения..., 1987, 1988].

Наиболее четкие связи отмечаются с данными по максимумам взвешенных веществ. На рис. 1 а, б приведено сопоставление годового хода среднего направления вектора ветра  $\varphi^0$  и модуля среднего вектора  $m_v$  с измеренными максимальными значениями пыли. Из рисунка видно, что максимумы пыли образуются в городе при юго-восточных ветрах  $\varphi^0$  и небольшом усилении скоростей ветра  $m_v$ . При северо-западном и западном направлениях ветра  $\varphi^0$  и слабом ветре  $m_v$  содержание взвешенных веществ в городе уменьшается в несколько раз. При более сильных ветрах юго-западного направления, которые наблюдаются в весенние месяцы, содержание пыли в городе значительно возрастает, а в осенние месяцы – уменьшается. Это связано с различными синоптическими условиями: весной увеличена повторяемость антициклонической деятельности, а осенью – циклонической. Анализ рис. 1 в, г позволяет уточнить, чем обусловлены наблюдаемые максимумы взвешенных веществ. Анализ рис. 1 в показывает, что максимумы пыли (в мае и июне соответственно), кроме среднего потока, были обусловлены также и трансграничными воздушными потоками западно-юго-западным и северо-западным направлений, на что указывает ориентация главной оси С.К.О.  $\alpha^0$ .

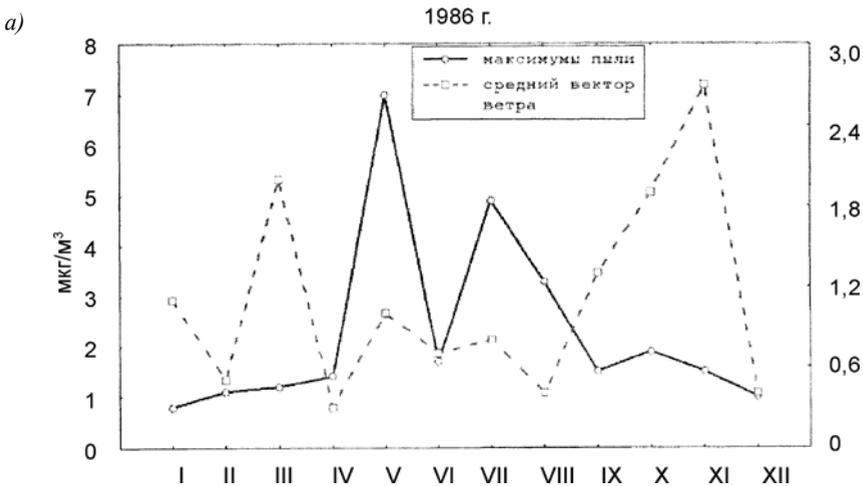


Рис. 1. Годовой ход векторных параметров ветра в 1986 г.

a – модуль среднего вектора  $m_v$ .

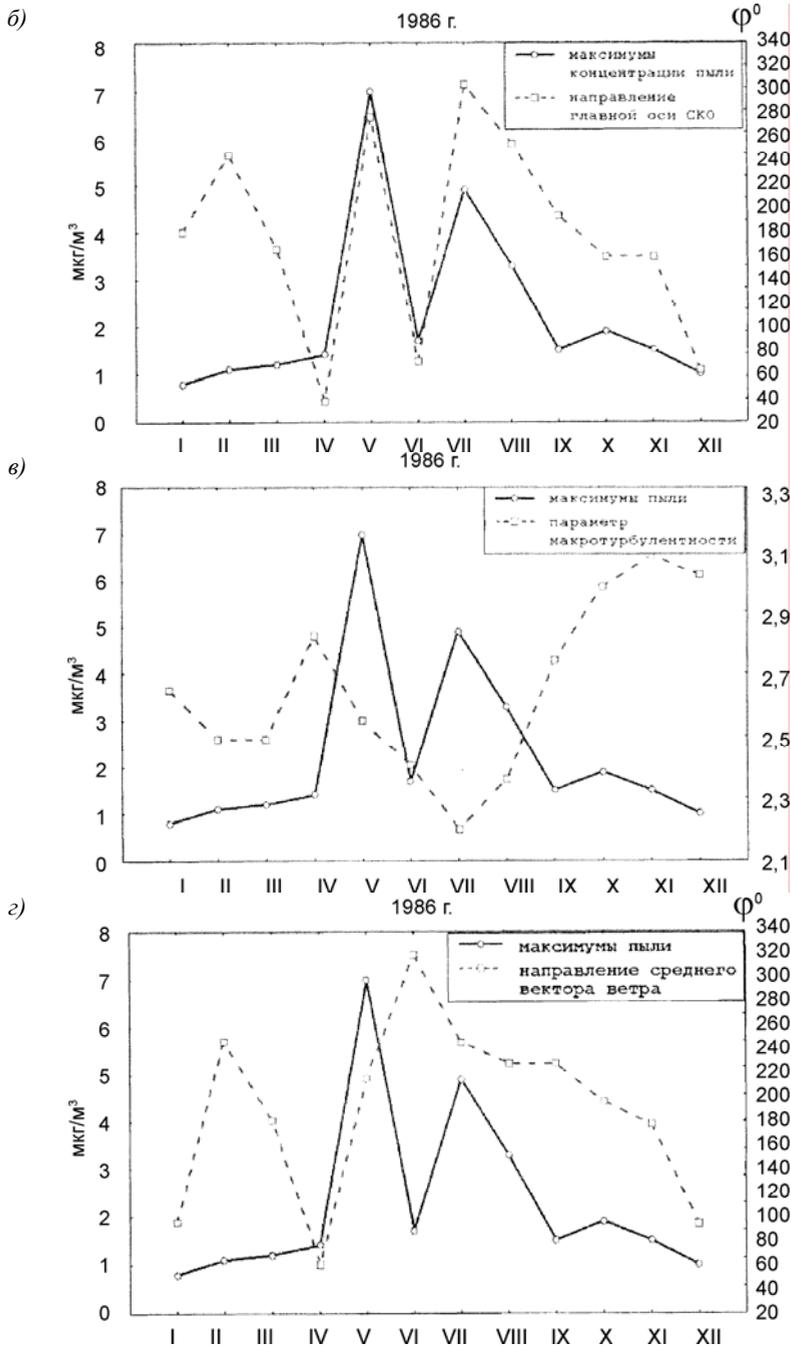


Рис. 1. Годовой ход векторных параметров ветра в 1986 г.

$\bar{\phi}$  – среднее направление вектора  $\phi$ ;

$\epsilon$  – инвариант макротурбулентности  $\sqrt{I_1}$ ;  $\bar{\alpha}_0$  – направление главной оси С.К.О.  $\alpha_0$ .

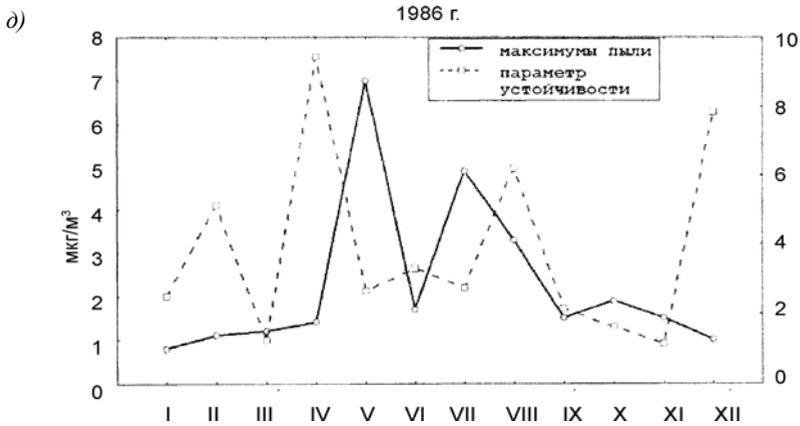


Рис. 1. Годовой ход векторных параметров ветра в 1986 г.  
 $\delta$  – параметр устойчивости воздушного потока  $r$ .

Интенсивность второго потока в мае оказалась невелика, о чем свидетельствует график инварианта макротурбулентности. Таким образом, интенсивность обоих потоков и их направления показывают, что максимум пыли в мае обусловлен обоими потоками, но главная роль отводится среднему потоку, поскольку значение параметра  $r$  мало. Интенсивность потока в июне, выражаемая  $\sqrt{I_1}$ , минимальна, что позволяет полагать о незначительной роли второго потока в образовании июньского максимума. Так же как и для мая, график параметра  $r$  четко определяет преобладающий вклад среднего потока в образовании июньского максимума пыли. Выполненный анализ показал, что увеличение значений взвешенных веществ в мае и июне обусловлено как средним, так и трансграничным потоками. Несколько иное распределение годового хода рассматриваемых характеристик можно увидеть на следующий год – 1987.

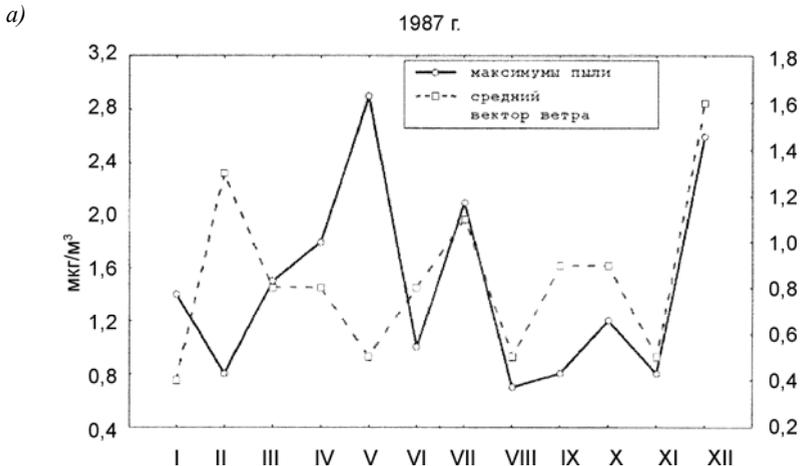


Рис. 2. Годовой ход векторных параметров ветра в 1987 г. а – модуль среднего вектора  $m$ .

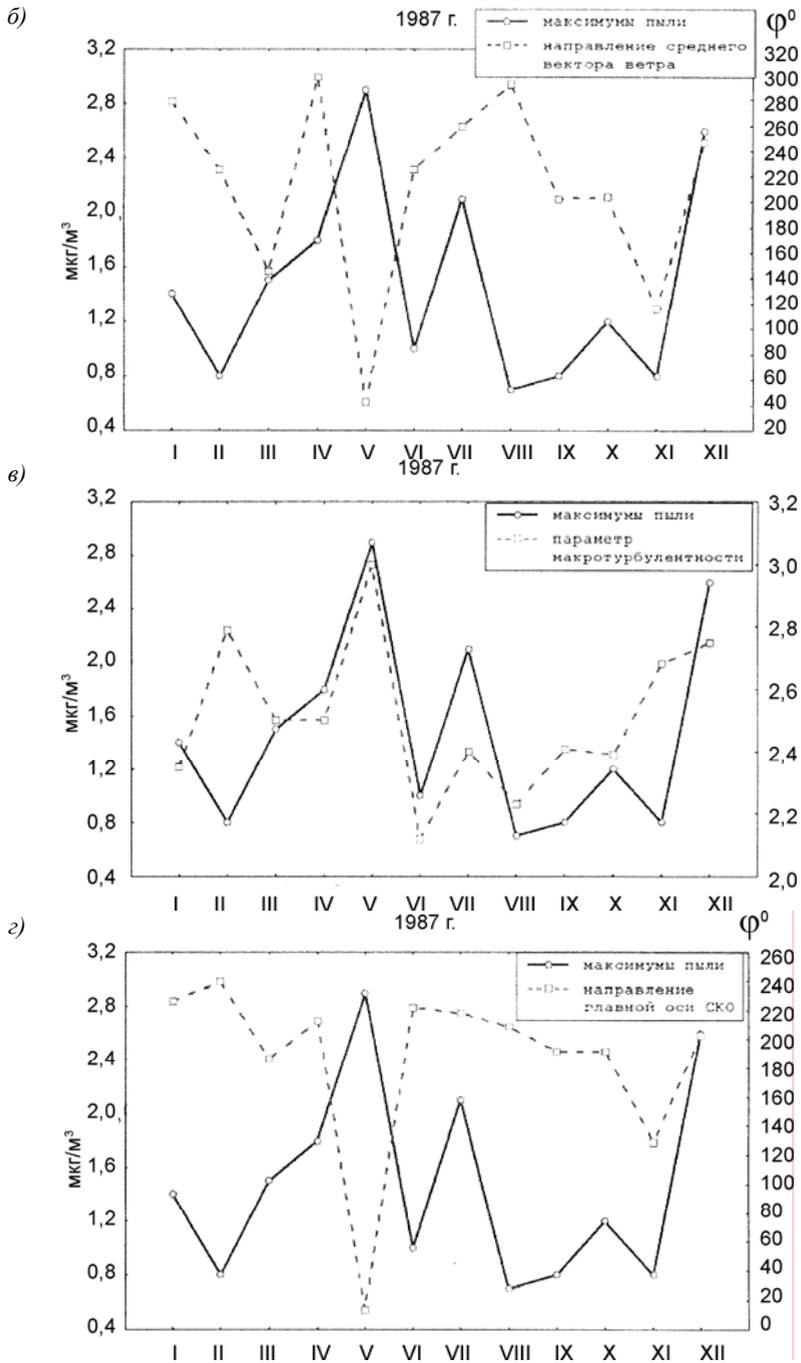


Рис. 2. Годовой ход векторных параметров ветра в 1987 г. б – среднее направление вектора  $\varphi$ ; в – инвариант макротурбулентности  $\sqrt{I_1}$ ; г – направление главной оси С.К.О.  $\alpha_0$ .

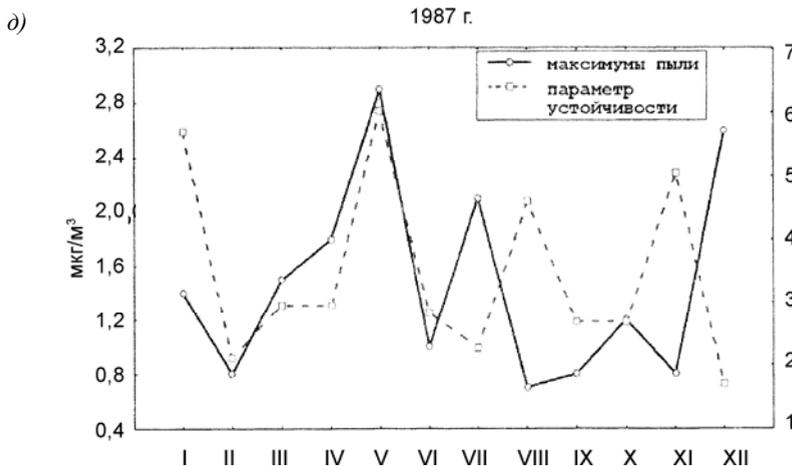


Рис. 2. Годовой ход векторных параметров ветра в 1987 г.  
 д – параметр устойчивости воздушного потока  $r$ .

На рис. 2 а, б приведено сопоставление годового хода среднего направления вектора ветра  $\varphi^0$  и модуля среднего вектора  $m_v$  с измеренными максимумами пыли в 1987 г. Из рисунка видно, что максимумы пыли наблюдались в мае, июне и декабре, из которых два последних, очевидно, связаны с усилением скорости среднего ветра  $m_v$ . Максимум пыли в мае, наоборот, наблюдался при малом значении  $m_v$ . При этом максимумы пыли в мае были образованы северо-восточным ветром  $\varphi^0$ , а для июня и декабря наблюдались юго-западные направления  $\varphi^0$ . Июньский максимум образовался в результате усиления среднего потока, который в целом по городу поднимал в воздух взвешенные вещества от строительства, промышленности, автотранспорта и т. д. Этому способствовало малое количество осадков. В декабре 1987 г. максимум взвешенных веществ был связан с деятельностью энерго - топливного комплекса и наличием малого количества осадков.

Анализ рис.2 в, г показывает, что для мая значения  $\varphi^0$  и  $\alpha^0$  близки и составляют соответственно  $40^0$  и  $15^0$ , но поскольку величина  $m_v$  мала, то следует ожидать, что данный максимум связан с увеличением инварианта макротурбулентности. Действительно, график  $\sqrt{I_1}$  показывает самую большую величину в мае, что подтверждает сделанный вывод. Поскольку в Калининском районе наблюдается повышенное содержание взвешенных веществ [Ежегодник..., 1987, 1988; Экологическая..., 2004], то при северо-восточных ветрах они не выносятся из города, а наоборот переносятся в центральную часть города при синоптических ситуациях, обуславливающих повышенную скорость ветра. Обращаясь к графику параметра  $r$  (рис. 2 д), мы хорошо видим, что вклад среднего потока определил максимумы пыли в июне и декабре, а майским максимум вызван переменным потоком.

Таким образом, выполненные исследования показали, что, анализируя пять основных параметров ветра в сопоставлении с атмосферными примесями, а также зная расположение источников выбросов, можно подробно определить причины образования значительных концентраций примесей. Векторные параметры ветра при знании расположения источников выбросов позволяют объяснить появление максимумов примесей, которые образованы или локальными источниками выбросов, или связаны с трансграничным переносом.

### **Литература**

1. *Боков В.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А.* Методы анализа пространственной и временной изменчивости скоростей ветра. // *Метеорология и гидрология*, 1987, № 3, с. 106–109.
2. *Боков В.Н., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А.* Анализ векторных процессов. В кн.: *Режимообразующие факторы, информационная база и методы ее анализа.* – Л.: Гидрометеоздат, 1989, с. 77–86.
3. *Боков В.Н.* Мониторинг климатических изменений скорости ветра в 1980-е годы. // *Метеорология и гидрология*, 1994, № 1, с. 49–55.
4. Ежегодник загрязнения атмосферного воздуха городов на территории деятельности СЗУГКС за 1986 год. СЗУГМС, Ленинградский центр по изучению и контролю загрязнения природной среды. – СПб., 1987. – 167 с.
5. Ежегодник загрязнения атмосферного воздуха городов на территории деятельности СЗУГКС за 1987 год. СЗУГМС, Ленинградский центр по изучению и контролю загрязнения природной среды. – СПб., 1988. – 179 с.
6. Методическое письмо по вероятностному анализу векторных временных рядов течений и ветра. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 64 с.
7. *Потапов А.И., Воробьев В.Н., Карлин Л.Н., Музалевский А.А.* Мониторинг, контроль, управление качеством окружающей среды. / Ч. I. Мониторинг окружающей среды. – СПб., 2002. – 431 с.
8. *Сонькин Л.Р.* Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 223 с.
9. Экологическая обстановка в Санкт-Петербурге. // *Аналитический обзор за 25 лет* – СПб., 2004, 312–324 с.