

О РЕЖИМЕ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА В ЗАПАДНОЙ АНТАРКТИДЕ

ABOUT SURFACE WIND REGIME OVER WESTERN ANTARCTICA

Виктор Е. Лагун¹, Николай Е. Иванов¹, Светлана В. Яговкина²

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
ул. Беринга 38, Санкт-Петербург, 199397 Россия
lagun@aari.nw.ru, neivanov@aari.nw.ru

² Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
ул. Карбышева 7, Санкт-Петербург, 194021, Россия

Аннотация. Статистический анализ скорости приземного ветра выполнен по данным срочных (4 раза в сутки) измерений на станции Русская в западной Антарктиде за период с 1980 по 1990 гг. Оценки параметров межгодовой изменчивости, годовой ритмики, процессов синоптического масштаба и суточного хода с учетом низкочастотной модуляции получены в терминах вектора математического ожидания и инвариантов тензоров дисперсии и спектральной плотности в предположениях стационарности и периодической коррелированности векторного случайного процесса. Для параметризации изменчивости синоптического масштаба использована модель случайного импульсного процесса в виде последовательности “штормов” и “окон погоды”. “Шторм” означает превышение заданного уровня, а “окно погоды” – промежуток между двумя последовательными штормами. Для описания статистики синоптических явлений сформированы временные ряды характеристик интенсивности штормов, продолжительности штормов и окон погоды. Пороговые уровни заданы на основании квантильного анализа или как критерии опасных или особо опасных явлений погоды. Синоптическую изменчивость целесообразно анализировать по ряду, центрированному на средние годовые значения и годовой ход среднемесячных значений. Сезонную модуляцию и межгодовую изменчивость интенсивности процессов синоптического масштаба можно описать временным рядом внутримесячной дисперсии как реализации периодически коррелированного случайного процесса.

Ключевые слова: скорость приземного ветра, синоптическая изменчивость, многолетние тренды, Западная Антарктида

Построение наиболее полных архивов данных стандартных приземных измерений (Данилов и др. 2003, Turner и др. 2004, Turner и др. 2005) предоставило возможность получения надежных оценок параметров климатической изменчивости в Антарктиде. Многолетние временные ряды данных срочных метеорологических измерений позволяют анализировать межгодовую изменчивость, годовую ритмику, внутрисезонную изменчивость, процессы синоптического масштаба и суточный ход ключевых элементов климатического режима, включая скорость приземного ветра. Традиционный подход к диагнозу параметров ветрового режима, основанный на изучении отдельных компонентов скорости ветра как скалярных величин (Kruszewski 2006, Van Lipzig и др.

2004) в настоящей работе дополнен оценкой изменчивости характеристик ветрового режима с учетом его векторной природы на примере анализа результатов приземных измерений, выполненных в Западной Антарктиде на станции Русская. Станция Русская расположена на побережье Земли Мэри Бэрд на мысе Беркс (Берег Хобса) в точке с координатами $74^{\circ}46'$ ю.ш., $136^{\circ}50'$ з.д., высота метеорологической площадки над уровнем моря составляет 124 м (<http://south.aari.nw.ru>). Станция Русская расположена в центральной части огромного района Антарктиды, где метеорологические наблюдения практически отсутствуют. Экстремальные погодные условия, характерные для побережья Западной Антарктиды, формируются здесь при низких значениях температуры воздуха и ураганных ветрах.

В качестве исходной информации использованы данные стандартных измерений за весь период работы станции Русская (1980–1990 гг.). Наблюдения за скоростью ветра производились с помощью анеморумбометра М-63М, шкала которого оцифрована и поверена до значений скорости ветра 90 м/с.

Поддиапазонный статистический анализ временных рядов метеорологических элементов (Рожков 1996) позволяет оценить вклад взаимодействия процессов различных масштабов в формирование климатической изменчивости (Лагун и Иванов 2001, Лагун и др. 2006) на основе адекватных статистических моделей и оценивания вероятностных характеристик изменчивости с учетом векторной природы ветра.

Исчерпывающей вероятностной характеристикой стохастического евклидова вектора \vec{V} (с модулем $|\vec{V}|$ и направлением φ) как случайной величины является (Рожков 1996) закон двумерного распределения вероятностей $F(|\vec{V}|, \varphi)$, традиционно представляемый розой ветра. При анализе климатической изменчивости наряду с $F(|\vec{V}|, \varphi)$ целесообразно использовать квантили распределения (Рожков 2001) модуля $|\vec{V}|_{p^{(q)}}$ порядка p по выборкам, сгруппированным по румбам, определяющие диапазон значений модуля заданной вероятности. Центр распределения характеризует медиана ($p = 0.5$), оцениваемая центральным членом ранжированной выборки $|\vec{V}|_{1 \leq \vec{V}|_{2 \leq \dots \leq \vec{V}|_n}$. Медианы левой ($p = 0.25$) и правой ($p = 0.75$) половин ранжированной выборки называют нижней и верхней квантилями. Интервал $|\vec{V}|_{0.25 \div} |\vec{V}|_{0.75}$ называют интерквартильным расстоянием Q , он включает 50 % значений в окрестностях центра распределения, интервалы $|\vec{V}|_{\min \div} |\vec{V}|_{0.25}$ и $|\vec{V}|_{0.75 \div} |\vec{V}|_{\max}$ включают по 25 % аномальных значений. Еще одной важной характеристикой масштаба распределения является размах $R = |\vec{V}|_{\max} - |\vec{V}|_{\min}$.

Для сжатия информации о распределении и описания $\vec{V}(t)$ как случайного процесса используют моменты и моментные функции, определяемые векторно-алгебраическим методом (Белышев и др. 1983). Математическое ожидание в стационарном приближении есть вектор $\vec{m}_{\vec{V}}$ с модулем $|\vec{m}_{\vec{V}}|$ и направлением φ . Дисперсия в стационарном приближении есть симметричный тензор $\mathbf{D}_{\vec{V}}$, свойства которого раскрываются через инварианты – скалярные числа не изменяющиеся при развороте исходной системы координат. Собственные числа $\lambda_{1,2}$ характеризуют дисперсию по ортогональным направлениям и используются для геометрической интерпретации $\mathbf{D}_{\vec{V}}$ в виде эллипса с полуосями λ_1, λ_2 , развернутого на угол α относительно положительного направления оси ОУ исходной системы координат. Инвариантами тензора среднеквадратического отклонения $\sigma_{\vec{V}}$ являются числа $\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}$. Линейный инвариант I_1 тензора $\mathbf{D}_{\vec{V}}$

$$I_1 = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (1)$$

характеризует модуль общей изменчивости скорости независимо от того, изменяются ли модуль $|\vec{V}|$ или направление φ скорости ветра. Поэтому сопоставление I_1 с дисперсией D_V модуля скорости V как скалярной величины можно использовать для оценки вклада вращения.

Инвариант χ

$$\chi = \lambda_2 / \lambda_1 \quad (2)$$

характеризует вытянутость эллипса дисперсии - при $\chi=0$ происходят только реверсивные изменения скорости, либо изменяется лишь $|\vec{V}|$ при постоянном φ , а при $\chi=1$ интенсивность изменчивости по всем направлениям одинакова. Векторным аналогом коэффициента изменчивости является число

$$v = (I_1)^{0.5} / |\vec{m}_{\vec{V}}| \quad (3)$$

Спектральная плотность в стационарном приближении $S_{\vec{V}}(\omega)$ есть тензор-функция, содержащая симметричную и кососимметричную части. Неотрицательный инвариант $I_1(\omega)$ (1) симметричной части $S_{\vec{V}}(\omega)$ характеризует распределение по частотам интенсивности общей (по $|\vec{V}|$ и по φ) изменчивости, а знакопеременный инвариант $D(\omega)$ кососимметричной части $S_{\vec{V}}(\omega)$, называемый индикатором вращения, характеризует вклад вращения в общую дисперсию. Они связаны соотношением $I_1(\omega) \geq |D(\omega)|$. Если $D(\omega) > 0$, то преобладает вращение по часовой стрелке и наоборот, а $D(\omega) = 0$ может свидетельствовать не только об отсутствии вращения, но и об одинаковой интенсивности вращательных движений в обоих направлениях. Необходимым и достаточным условием отсутствия вращения является $I_1(\omega) = \lambda_1(\omega)$.

Годовая и суточная ритмика присущи большинству гидрометеорологических явлений, в том числе и скорости ветра в Антарктиде (Колосова 1982). Адекватной математической моделью, учитывающей регулярную повторяемость колебаний и стохастичность их параметров, является периодически коррелированный случайный процесс (Драган и др. 1987, Рожков 1996). Процесс называют периодически коррелированным, если его вероятностные характеристики инвариантны относительно сдвига на положительное число периодов коррелированности T (1 год или 1 сутки). Когерентные оценки вероятностных характеристик $\vec{m}_{\vec{V}}(t)$, $D_{\vec{V}}(t)$, $S_{\vec{V}}(\omega, t)$ получают по данным, взятым через T , т.е. за одноименные месяцы (сроки) после предварительного центрирования на средние за T значения. В силу периодичности они разложимы в ряд Фурье. Оценки компонентов Фурье m_k , D_k , $S_k(\omega)$ придают количественную определенность качественным особенностям годового (суточного) хода $\vec{m}_{\vec{V}}(t)$, $D_{\vec{V}}(t)$, $S_{\vec{V}}(\omega, t)$ и использованы ниже для сжатия информации и параметризации процессов с годовой и суточной ритмикой.

Математическое ожидание в приближении периодически коррелированного случайного процесса есть периодический вектор (Иванов и Рожков 1994, Рожков 1996)

$$\vec{m}_{\vec{V}}(t) = \vec{m}_0 + \sum_{k=1}^N \vec{m}_k(t), \quad (4)$$

где $\vec{m}_0 \equiv \vec{m}_{\vec{V}}$, $\vec{m}_k(t)$ – векторные гармоники, представленные годографами векторов $\vec{m}_k(t_j)$, j – номер месяца, концы которых за период T_k обходят эллипсы с параметрами $L_{1,2}^{(k)}$ – длина большой и малой полуосей, $\beta_k \pm \pi$ – ориентация большой оси в исходной системе координат,

$\psi_{k\pm\pi}$ – фаза (два момента максимума $|\bar{\mathbf{m}}_k|$), в направлении по часовой стрелке $J_k > 0$ или против часовой стрелки $J_k < 0$. Эти параметры определяют через амплитуды $A_{x,y}^{(k)}$ и фазы $\psi_{x,y}^{(k)}$ компонентов разложения в ряд Фурье проекций $m_x^{(k)}(t)$, $m_y^{(k)}(t)$. Дисперсионный вклад векторных гармоник $\bar{\mathbf{m}}_k$ в результирующий годовой ход $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{V}}(t)$ можно представить числами

$$\mu_k = \frac{[L_1^{(k)}]^2 + [L_2^{(k)}]^2}{\sum_{k=1}^m [L_k^{(k)}]^2 + [L_2^{(k)}]^2}. \quad (5)$$

В приближении периодически коррелированного случайного процесса $\mathbf{D}_{\bar{V}}(t)$ – периодическая тензор-функция, инварианты которой являются скалярными периодическими функциями (Рожков 1996). Для описания эволюции $\mathbf{D}_{\bar{V}}(t)$ во времени использованы ряды параметров разложения (4) исходных данных $\bar{\mathbf{V}}(t)$ на годовых отрезках (Иванов и Рожков 1996).

Когерентной оценкой спектральной плотности в является поверхность (Драган и др. 1987, Рожков 1996) $S_{\bar{V}}(\omega, t)$, которую можно графически представить набором сечений по t . В компонентном методе распределение по частотам средней за T мощности колебаний, оставшихся после центрирования на средние годовые значения и $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{V}}(t)$, характеризует нулевой спектральный компонент $\mathbf{s}_o(\omega)$, обладающий всеми свойствами спектральной плотности и связанный с $S_{\bar{V}}(\omega)$ соотношением

$$S_{\bar{V}}(\omega) = \mathbf{s}_o(\omega) + \sum_{k=-N}^N |\bar{\mathbf{m}}_k|^2 \delta(\omega + k \frac{2\pi}{T}). \quad (6)$$

Таким образом, $\mathbf{s}_o(\omega)$ уже не содержит составляющих, определяющих мощность регулярных колебаний.

Суточный ход скорости ветра в Антарктиде в значительной степени обусловлен кататическим эффектом (Колосова 1982) из-за усиления выхолаживания приповерхностного воздуха в ночные и предутренние часы. Сезонную модуляцию суточного хода описывает модель бипериодически коррелированного случайного процесса (Драган и др. 1987, Рожков 1996). В когерентном методе она реализована в форме оценок $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{V}}(t)$, $\mathbf{D}_{\bar{V}}(t)$, $S_{\bar{V}}(\omega, t)$ на суточном периоде $T = 24$ часа по месяцам, а в компонентном методе – посредством разложения этих оценок в двойной ряд Фурье на периодах коррелированности $T_1 = 1$ сутки, $T_2 = 1$ год.

Синоптическую изменчивость целесообразно анализировать по ряду $\bar{\mathbf{V}}^o(t)$, центрированному на средние годовые значения и годовой ход среднемесячных значений. Сезонную модуляцию и межгодовую изменчивость интенсивности процессов синоптического масштаба можно описать временным рядом внутримесячной дисперсии $\mathbf{D}_{\bar{V}^o}$ как реализации периодически коррелированного случайного процесса. Синоптическая изменчивость в атмосфере представляет собой динамику (зарождение, перемещение, трансформацию и исчезновение) циклонов и антициклонов. Поэтому для ее описания целесообразно использовать последовательность “штормов” и “окон погоды” в форме модели случайного импульсного процесса (Лагун и др. 2006, Рожков 2001). “Шторм” означает выход $\bar{\mathbf{V}}^o(t)$ за заданный уровень z_i , а “окно погоды” – промежуток между двумя последовательными штормами. Тогда параметризация сводится к формированию последовательностей трех чисел – мощности h_i штормов, продолжительности

t_i штормов и окон погоды θ_i . Уровни z_j задают (например, на основании квантильного анализа или как критерии опасных или особо опасных явлений погоды).

Экстремумы модуля $|\vec{V}|(t)$ векторного случайного процесса можно анализировать по данным, сгруппированным по румбам. Использование в качестве экстремумов квантилей $|\vec{V}|_{p^{(k)}}$ редкой повторяемости (например, 3 % обеспеченности $p = 0.97$) позволяет оценить значения, возможные 1 раз в N лет (Алексеев и др. 1999, Рожков 2001). Оценки повторяемости P_j экстремумов по месяцам $j=1\div 12$ позволяют представить распределение годовых F_{extr} экстремумов смесью ежемесячных распределений F_j (Алексеев и др. 1999).

Тренд во временных рядах скорости ветра \vec{a} определен как (Боков и др. 2001)

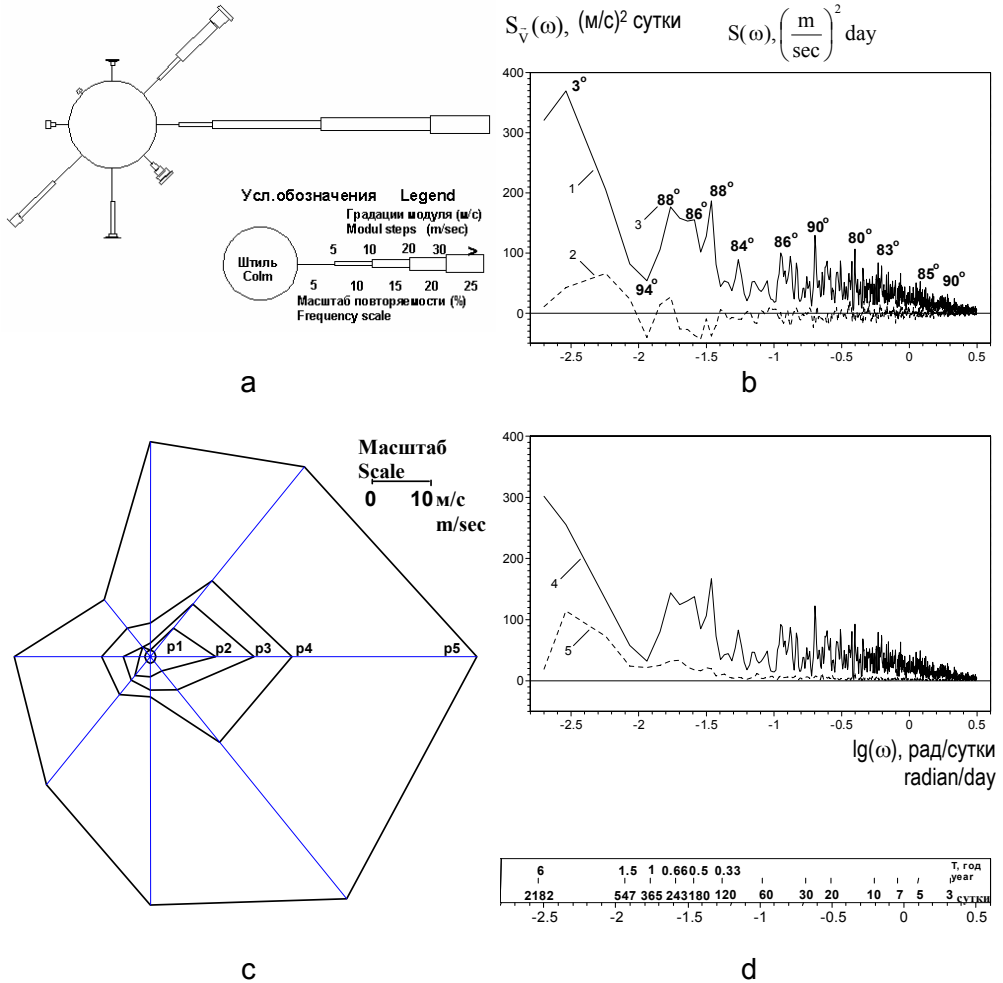
$$\vec{V}(t) = \vec{m}_{\vec{V}} + \vec{a}t + \vec{\varepsilon}(t), \quad (7)$$

где $\vec{a} \{a_x, a_y\}$ – вектор с декартовыми компонентами a_x, a_y , являющимися наклонами трендов проекций, определяемых по линейной регрессионной модели (Дрейпер и Смит 1986) $V_{x,y}(t) = m_{V_{x,y}} + a_{x,y}t + \varepsilon_{x,y}(t)$. Параметрами тренда являются модуль и направление векторного аналога углового коэффициента \vec{a} и инварианты тензора дисперсии D_{ε} аномалий относительно тренда. Из (7) следует, что тренд скорости ветра может проявляться не только через усиление/ослабление скорости, но и через разворот. Признаком преобладания первого из названных эффектов является выполнение условия $\varphi_{\vec{a}} \pm \pi \approx \varphi_{\vec{m}_{\vec{V}}}$, а признаком наличия второго из названных эффектов является выполнение условия

$$\varphi_{\vec{a}} \pm \pi \approx \varphi_{\vec{m}_{\vec{V}}} \pm \frac{\pi}{2}.$$

Общая характеристика поддиапазонной изменчивости представлена на рис. 1 и в табл. 1–3. Двумерная повторяемость скорости ветра $P(|\vec{V}|, \varphi)$ представлена розой ветра (рис. 1а) – штиль показан кружком в центре, на каждом румбе выделено по 5 градаций $|\vec{V}|$ (слабый 1–5 м/с, умеренный 6–10 м/с, сильный 11–20 м/с, очень сильный 21–30 м/с и штормовой ветер 30 м/с и более), обозначенных прямоугольниками различной высоты, а диаметр круга и длина прямоугольников соответствуют повторяемости. Две наиболее яркие и взаимосвязанные особенности распределения – исключительно сильный контраст между румбами восточной четверти и остальными и большая повторяемость очень сильных и штормовых ветров восточной четверти в результате взаимодействия синоптических процессов и кататического эффекта. На других румбах повторяемость ветра с $|\vec{V}| > 20$ м/с нулевая или ничтожно мала. Второй (более слабый) максимум повторяемости по φ имеет юго-западный ветер, но он обусловлен повышенной повторяемостью слабого и умеренного ветра. Наименьшую повторяемость имеет северо-западный ветер, у которого $|\vec{V}|$ не превышает 10 м/с.

Для многих видов деятельности за критерий опасного явления погоды принят $|\vec{V}| > 10$ –12 м/с, а за критерий особо опасного явления погоды принят $|\vec{V}| > 30$ м/с. Из квантильной диаграммы (рис. 1б) видно, что в восточной четверти критерий опасного явления не превышают всего лишь 25 % (интервал p_1 – p_2) наиболее слабых ветров, 50 % значений $|\vec{V}|$ в окрестностях центра распределения (интерквартильное расстояние p_2 – p_4) приходится на сильные ветры, 25 % положительных аномалий (интервал p_4 – p_5) представлены очень сильными и штормовыми ветрами, причем особо опасные явления отмечаются почти в 10 % случаев. Учитывая, что общая повто-



Порядок квантилей распределения модуля скорости (b):
 p1 – min, p2 – 0.25, p3 – 0.5, p4 – 0.75, p5 – max

Speed module quantile distribution (b):
 p1 – min, p2 – 0.25, p3 – 0.5, p4 – 0.75, p5 – max

Инварианты спектрального тензора (c, d):

- 1 – линейный инвариант $I_1(\omega)$,
- 2 – индикатор вращения $D(\omega)$,
- 3 – ориентация большой оси $\alpha(\omega)$,
- 4 – большая ось $\lambda_1(\omega)$,
- 5 – малая ось $\lambda_2(\omega)$.

Spectral tensor invariants (c, d):

- 1 – linear invariant $I_1(\omega)$, 2 – rotation indicator $D(\omega)$,
- 3 – major axis orientation $\alpha(\omega)$, 4 – major axis $\lambda_1(\omega)$,
- 5 – minor axis $\lambda_2(\omega)$

Рис. 1. Оценки вероятностных характеристик скорости ветра по данным срочных измерений: а – роза ветра, б – квантили распределения модуля скорости по румбам (без учета штиля), с – инварианты тензора спектральной плотности, d – спектральная плотность модуля скорости

Fig. 1. Estimates of probabilistic characteristics of wind speed from 6-hourly data: а – wind rose, б – quantile of speed module rhumb distribution (without calm), с, d – spectral density tensor invariants, e – spectral density of wind speed module

ряемость восточных ветров наиболее велика, а их $|\bar{V}|$ достигает 50 м/с и более, условия в районе станции Русская по этому показателю похожи на условия восточного побережья Антарктиды (Колосова 1982, Справочник ...1981), и эти районы являются одним из мировых полюсов штормовой активности.

Таблица 1 – Table 1

Средние многолетние значения скорости ветра \bar{m}_v , максимального модуля $|\bar{v}|$ и оценки инвариантов тензора дисперсии D_v скорости ветра и дисперсии ее модуля D_v при различном масштабе осреднения исходных данных станции Русская (1980–1990 гг.)

Multiyear mean estimates of wind speed \bar{m}_v , of maximal module $|\bar{v}|$, estimates of wind speed dispersion tensor D_v invariants and speed module dispersion D_v for different averaging scales for Russkaya station original data (1980–1990)

Масштаб осреднения Averaging scales		Срочные, Six-hourly, N=14484	Среднесуточные, Daily mean, N=3621	Среднемесячные, Monthly, N=119	Среднегодовые, Annual, N=10
Среднее Mean	$ \bar{m}_v $ м/с m/sec	10.1			
	φ град degree	86			
Дисперсия Dispersion	D_v м ² /с ² m ² /sec ²	111.1	93.3	13.1	1.3
	I_1 м ² /с ² m ² /sec ²	176.9	138.1	18.9	4.5
	χ^* -	0.15	0.12	0.35	0.51
	α град degree	79	79	75	175
Максимум Maximum	$ \bar{v} $ м/с m/sec	60	57.0	20.6	11.9

Примечание: Здесь и в остальных таблицах инвариант χ приведен для тензора среднего квадратического отклонения, N – число членов ряда.

Comment: *Here and in following tables invariant χ is presented for mean square deviation tensor, N is row number

В табл. 1 приведены оценки средней скорости ветра \bar{m}_v и инвариантов тензора D_v при различных масштабах осреднения исходных данных. Инвариант I_1 показывает, что наибольший вклад в общую дисперсию вносит межсуточная изменчивость. Ориентация α эллипса D_v срочных, среднесуточных и среднемесячных значений практически совпадает с направлением среднего переноса φ , а у среднегодовых значений отличается почти на 90°. Инвариант χ указывает на существенную роль вращения для среднемесячных и особенно среднегодовых значений. Сопоставление I_1 с дисперсией модуля D_v показывает, что анализ одного лишь V без учета φ занижает дисперсию на 40-60 % для срочных, среднесуточных и среднемесячных значений, а для среднегодовых значений происходит более чем трехкратное уменьшение дисперсии.

Таблица 2 – Table 2

Оценки вероятностных характеристик годового и суточного хода модуля $|\bar{m}_v|$ и направления φ средней скорости ветра $\bar{m}_v(t)$, инварианта l_1 и ориентации α эллипса дисперсии $D_v(t)$, вытянутости χ эллипса среднего квадратического отклонения $\sigma_v(t)$ и коэффициента изменчивости v

Estimates of probabilistic characteristics of annual and diurnal course of mean wind speed module $|\bar{m}_v|$ and speed direction φ $\bar{m}_v(t)$, invariant l_1 and orientation α of dispersion ellipse $D_v(t)$, mean square deviation $\sigma_v(t)$ of ellipse compression χ and coefficient of variation v

Месяц Month	Срок Time	Среднее Mean		Дисперсия и среднее квадратическое отклонение Dispersion and mean square deviation							
				Срочные данные 6-hourly data				Среднемесячные данные Monthly data			
		$ \bar{m}_v $	φ	$l_1^{(D)}$	$\alpha^{(D)}$	$\chi^{(\sigma)}$	v	$l_1^{(D)}$	$\alpha^{(D)}$	$\chi^{(\sigma)}$	v
		м/с m/sec	град degrees	м ² /с ² m ² /sec ²	град degrees	-	-	м ² /с ² m ² /sec ²	град degrees	-	-
I	ночь night	8.4	86	106.4	77	0.30	1.52	9.1	65	0.38	0.46
	утро morning	8.5	82	110.7	76	0.33	1.57	10.4	60	0.50	0.51
	день day	7.4	82	109.5	74	0.30	1.75	8.3	55	0.57	0.53
	вечер evening	7.5	85	109.7	74	0.29	1.73	9.1	59	0.48	0.54
II	night	8.8	88	101.4	78	0.29	1.42	6.6	65	0.48	0.39
	morning	8.6	86	108.0	79	0.31	1.50	6.2	65	0.47	0.39
	day	7.6	85	116.4	77	0.31	1.78	6.6	60	0.47	0.45
	evening	7.8	88	111.8	76	0.30	1.69	5.9	67	0.50	0.42
III	night	11.9	88	176.5	82	0.35	1.42	23.1	93	0.53	0.55
	morning	12.3	87	184.9	82	0.36	1.41	25.9	102	0.57	0.56
	day	11.6	86	186.6	79	0.36	1.52	26.0	88	0.64	0.61
	evening	11.7	87	179.1	82	0.34	1.45	28.6	87	0.61	0.61
IV	night	12.6	87	205.4	82	0.34	1.44	39.7	78	0.41	0.65
	morning	12.5	88	193.5	79	0.35	1.42	32.0	78	0.39	0.59
	day	12.7	87	205.8	81	0.39	1.46	28.4	76	0.46	0.63
	evening	12.5	89	208.2	78	0.35	1.47	38.2	73	0.40	0.64
V	night	12.7	85	205.7	82	0.41	1.47	22.6	46	0.48	0.50
	morning	13.3	84	215.7	81	0.45	1.43	28.3	42	0.48	0.54
	day	13.5	86	212.3	81	0.43	1.42	29.1	44	0.51	0.54
	evening	12.8	84	215.4	81	0.44	1.51	25.1	47	0.63	0.54
VI	night	10.5	89	221.7	81	0.42	1.86	17.9	59	0.74	0.56
	morning	10.6	87	229.2	83	0.48	1.91	19.2	36	0.77	0.58
	day	10.5	89	231.0	82	0.52	1.95	20.9	30	0.78	0.61
	evening	10.5	86	202.0	82	0.43	1.86	14.6	34	0.80	0.51
VII	night	9.5	85	202.2	78	0.39	1.93	19.9	57	0.62	0.65
	morning	10.1	84	191.8	76	0.41	1.79	21.3	59	0.68	0.64
	day	9.9	86	197.2	76	0.42	1.85	22.4	67	0.70	0.66
	evening	9.8	87	203.7	77	0.40	1.88	19.7	54	0.62	0.62
VIII	night	9.8	88	207.9	77	0.37	1.88	25.1	74	0.44	0.67
	morning	9.7	86	194.8	80	0.37	1.85	26.8	74	0.44	0.70
	day	9.2	89	194.4	79	0.39	1.96	23.7	72	0.48	0.71
	evening	9.4	87	191.9	80	0.37	1.90	23.4	75	0.51	0.69

IX	night	8.2	89	188.0	77	0.42	2.18	10.6	17	0.72	0.55
	morning	8.5	88	193.7	76	0.45	2.17	9.7	19	0.56	0.50
	day	7.9	89	172.5	75	0.42	2.19	10.6	40	0.59	0.56
	evening	8.0	88	173.1	75	0.45	2.17	10.1	27	0.65	0.55
X	night	11.3	87	199.6	82	0.38	1.61	18.8	106	0.82	0.54
	morning	11.6	86	197.8	81	0.40	1.57	18.5	41	0.84	0.53
	day	10.9	85	192.6	79	0.36	1.63	13.0	66	0.89	0.47
	evening	10.8	86	197.8	8	0.35	1.66	15.0	91	0.77	0.50
XI	night	9.4	87	144.0	79	0.32	1.60	12.1	92	0.52	0.50
	morning	9.4	83	144.4	79	0.34	1.63	13.9	92	0.52	0.54
	day	8.8	83	155.3	77	0.32	1.79	15.0	91	0.49	0.59
	evening	8.9	86	144.8	78	0.31	1.70	15.9	88	0.45	0.59
XII	night	9.0	84	121.1	77	0.30	1.52	10.5	77	0.50	0.48
	morning	8.9	81	123.0	79	0.30	1.55	8.5	77	0.43	0.43
	day	7.5	80	132.2	73	0.31	1.92	9.3	71	0.55	0.55
	evening	7.8	83	130.9	74	0.32	1.86	8.0	71	0.53	0.49

На графиках инвариантов тензора спектральной плотности (рис. 1с, d) выделяются межгодовые колебания с периодом более 2 лет, годовая ритмика с пиками (примерно одинаковой высоты) на частотах годовой и полугодовой гармоник и в диапазоне 8–10 месяцев, внутрисезонные колебания с периодами 15–60 суток, связанные в первую очередь с крупномасштабными процессами (длинные атмосферные волны, цикл индекса и т.д.) и колебания синоптического масштаба с периодами 2–10 суток. Оценка спектральной функции в реальном масштабе ω (графики даны для наглядности в полулогарифмическом масштабе) показывает, что на эти диапазоны приходится 4 %, 5 %, 25 % и 55 % общей дисперсии, соответственно. Вклад в дисперсию суточной ритмики составляет всего лишь около 1 %. В диапазонах внутрисезонной и синоптической изменчивости дисперсия почти полностью обусловлена изменчивостью зонального переноса ($\alpha \cong 90^\circ$, $\chi \cong 0$). На частоте годового и полугодового колебаний χ несколько увеличивается, знак $D(\omega)$ указывает на преобладание вращения по часовой стрелке на $T=12$ месяцев и на преобладание вращения против часовой стрелки на $T=6$ месяцев. В диапазоне межгодовых колебаний резко возрастает роль вращения (преимущественно по часовой стрелке), а направление максимальной изменчивости α становится меридиональным.

В табл. 2 и 3 приведены характеристики годового и суточного хода средней скорости ветра $\bar{m}_{\bar{v}}(t)$ и оценок дисперсии $D_{\bar{v}}(t)$ и среднего квадратического отклонения $\sigma_{\bar{v}}(t)$ срочных значений $\bar{V}(t)$ и среднемесячного переноса $\bar{m}_{\bar{v}}(t_j)$ по срокам (табл. 2) и в среднем за сутки (табл. 3). Направление $\varphi(t)$ средней скорости практически постоянно ($80 \div 88^\circ$) в течение года и не имеет суточного хода. Годовой ход $|\bar{m}_{\bar{v}}(t)|$ с размахом около 6 м/с имеет 2 максимума в переходные сезоны – главный в мае и вторичный в октябре и 2 минимума – главный летом и вторичный в конце зимы. Суточный ход $|\bar{m}_{\bar{v}}(t)|$ с максимумом ночью и утром и минимумом днем и вечером проявляется только в теплый сезон, его размах достигает 1.0–1.5 м/с. Годовой ход инварианта $I_1(t)$ тензора $D_{\bar{v}}(t)$ срочных значений имеет максимум в июне и минимум в январе-феврале, размах $I_1^{0.5}(t)$ составляет около 5 м/с. Размах суточного хода $I_1^{0.5}(t)$ изменяется от месяца к месяцу от 2 до 5.5 м/с, его форма и фаза в течение года не стабильны. Ориентация $\alpha(t)$ не имеет годового и суточного хода и почти совпадает с $\varphi(t)$ (отклонение к северу φ от α не превышает $10 \div 15^\circ$). Вклад вращения в общую дисперсию срочных значений $\bar{V}(t)$ необходимо учитывать,

поскольку инвариант $\chi(t)$ тензора $\sigma_{\bar{v}}(t)$ составляет 0.3÷0.4 в теплый сезон и 0.4–0.5 в холодный сезон. В течение всего года $\bar{V}(t)$ неустойчив, т.к. $v(t) > 1$, и изменяется от 1.4–1.7 летом и в переходные сезоны до 1.8–2.2 зимой. Суточный ход $\chi(t)$ и $v(t)$ не выражен.

Инвариант $I_1(t)$ дисперсии среднемесячного переноса уменьшается в сравнении с дисперсией срочных значений в 5–10 раз в теплый сезон и в 10÷20 раз в холодный сезон, т.е. зимой разброс направлений $\varphi(t)$ больше, чем летом. Годовой ход $I_1(t)$ имеет сложную форму – главный максимум отмечается в апреле и вторичный максимум в ноябре, главный минимум отмечается в феврале и вторичный в сентябре, размах годового хода $I_1^{0.5}(t)$ составляет 3 м/с, а размах суточного хода не превышает 2 м/с. Ориентация $\alpha(t)$ эллипса дисперсии среднемесячного переноса изменяется в течение года, так что направления максимальной изменчивости и среднего переноса в отдельные месяцы различаются на 50–70°. Вклад в дисперсию вращения среднемесячного переноса больше, чем для мгновенных значений, поскольку $\chi(t)$ изменяется от 0.4–0.6 в теплый сезон до 0.6–0.9 в холодный сезон. Среднемесячный перенос весь год устойчив – $v(t)$ составляет 0.4÷0.7. Суточный ход $\alpha(t)$, $\chi(t)$ и $v(t)$ при месячном осреднении исходных данных выражен слабо.

Таблица 3 – Table 3

Оценки средней многолетней скорости ветра $\bar{m}_{\bar{v}}$, инвариантов тензора $D_{\bar{v}}$ дисперсии среднемесячных и среднегодовых данных, коэффициента \bar{a} векторного линейного тренда и инвариантов тензора $D_{\bar{\varepsilon}}$ дисперсии аномалий относительно тренда

Estimates of mean multiyear wind speed $\bar{m}_{\bar{v}}$, invariants of dispersion tensor $D_{\bar{v}}$ of original monthly mean and annual mean data, coefficient \bar{a} of vector linear trend and invariants of anomaly dispersion tensor $D_{\bar{\varepsilon}}$ relative to trend

Месяц Month	$\bar{m}_{\bar{v}}$		$D_{\bar{v}}$			\bar{a}		$D_{\bar{\varepsilon}}$		
	$ \bar{m}_{\bar{v}} $	φ	I_1	α	χ	$ \bar{a} $	φ_a	$I_1^{(e)}/I_1^{(v)}$	α	χ
	м/с m/sec	град degrees	м ² /с ² m ² /sec ²	град degrees	-	м/с m/sec	град degrees	%	град degrees	-
I	8.0	83	8.8	59	0.47	0.46	63	70	55	0.58
II	8.2	86	6.0	63	0.47	0.23	48	90	66	0.49
III	11.9	87	25.3	93	0.56	0.99	276	71	88	0.71
IV	12.6	86	35.4	76	0.42	0.65	38	86	82	0.33
V	13.1	84	25.6	43	0.50	0.51	6	88	49	0.45
VI	10.5	87	17.3	37	0.78	0.66	2	69	69	0.60
VII	9.8	85	20.1	57	0.66	0.62	343	76	63	0.34
VIII	9.5	87	23.6	73	0.45	0.38	8	92	75	0.35
IX	8.2	88	9.5	24	0.62	0.37	33	83	18	0.69
X	11.1	85	15.7	89	0.90	0.20	323	97	82	0.88
XI	8.9	85	15.9	87	0.46	0.39	64	88	93	0.45
XII	8.3	81	8.1	75	0.50	0.33	73	84	76	0.56
Год Annual mean	10.1	86	4.5	356	0.71	0.28	18	82	339	0.74

Сопоставление изменчивости межгодового и синоптического масштаба с учетом сезонных особенностей в графической форме представлено на рис. 2b совмещенными эллипсами среднего квадратического отклонения среднесуточных и среднемесячных (или среднегодовых) данных. При различном масштабе осреднения данных эллипсы отличаются не только длиной осей, но также формой (июль) и ориентацией (среднегодовые).

В табл. 3 приведены характеристики годового и суточного хода многолетних максимумов модуля срочных и среднемесячных значений \bar{V} . Годовой ход $\text{MAX}\{|\bar{V}|\}$ по срочным данным согласуется с годовым ходом $|\bar{m}_v|$, наибольшие значения отмечаются в переходные сезоны – в марте-апреле 55–60 м/с, а в сентябре-октябре 45–55 м/с. Зимой $\text{MAX}\{|\bar{V}|\}$ уменьшается до 40–50 м/с, летом до 30–40 м/с. Различия $\text{MAX}\{|\bar{V}|\}$ между сроками не велики и связаны не только с суточным ходом, но и с выборочной изменчивостью времени начала и окончания штормов. Направление максимальной скорости в большинстве случаев составляет 70–90°, но в отдельных случаях имеет небольшую южную составляющую – 100–125°. Среднесуточные значения $\text{MAX}\{|\bar{V}|\}$ лишь немногим меньше срочных, т.е. в каждом шторме $\varphi(t)$ почти не изменяется. Эти закономерности отмечаются и в тех случаях, когда наблюдаемые экстремумы в разные сроки отмечались в различные даты и даже годы. Следовательно, штормовые ветры в этом районе всегда формируются одним и тем же комплексом условий. Поскольку сильные и штормовые ветры отмечаются только у ветров восточных румбов и их направление в каждом шторме стабильно, значения $\text{MAX}\{|\bar{m}|\}$ среднемесячного переноса также исключительно велики и составляют в апреле 20–22 м/с, в октябре 15–17 м/с и только летом уменьшаются до 10–13 м/с. Направление $\text{MAX}\{|\bar{m}|\}$ всегда составляет 70–100°.

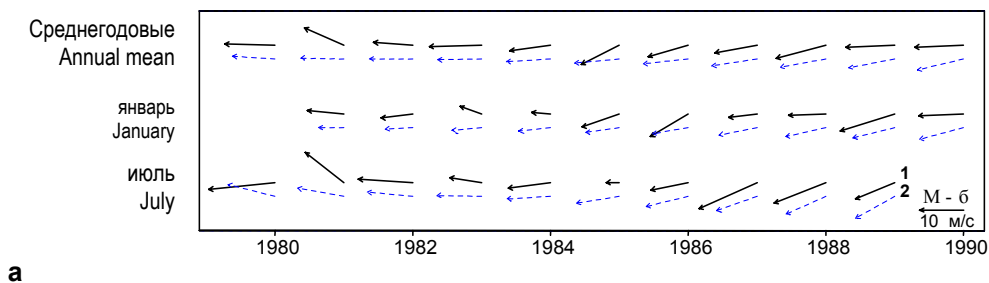
Ряд среднегодовых значений $\bar{V}(t)$ приведен на рис. 2а. Процесс $\bar{V}(t)$ устойчив, поскольку $v < 1$ (см. табл. 1), а большая ось эллипса D_v и вектор \bar{m}_v ортогональны (рис. 2b). Согласно рис. 2а, это связано с заметными выборочными отклонениями φ к югу (1985 г.) и к северу (1981 г.) при почти постоянном $|\bar{V}|$. У среднемесячных значений существенные межгодовые изменения происходят как у \bar{V} , так и у φ .

Традиционным методом анализа климатических переменных является аппроксимация рядов среднегодовых значений линейным трендом. В табл. 3 и на рис. 2а, б приведены оценки модуля $|\bar{a}|$ и направления φ_a векторного коэффициента линейного тренда (7) и инвариантов тензора дисперсии относительно тренда D_ε . Для среднегодовых значений тренд приводит к небольшому (около 0.3 м/с за год) усилению скорости ветра, что объясняет около 20 % дисперсии среднегодовых значений. В зависимости от месяца величина $|\bar{a}|$ изменяется от 0.2 до 1.0 м/с, возрастая с марта по июль. Соотношение φ_a и φ_v показывает, что с ноября по февраль тренд вызывает в основном усиление среднего ветра, а в остальные месяцы и в среднем за год приводит к левому развороту. В зависимости от месяца тренд объясняет от 3 до 30% дисперсии среднемесячных значений, форма χ и ориентация α эллипсов D_ε и D_v близки (кроме июня по α и июля по χ). Размах годового хода \bar{a} среднемесячных значений превосходит по модулю \bar{a} среднегодовых значений, что косвенно свидетельствует о том, что модуляция годовой ритмики вносит в межгодовую изменчивость больший вклад, чем средние годовые значения. Все тренды статистически незначимы на 95 % уровне.

Годовая ритмика в обычно традиционно представляется статистическими характеристиками данных, сгруппированных по одноименным месяцам (сезонам) - табл. 2–4. Модель периодически

коррелированного случайного процесса позволяет выразить годовую ритмику как целостный образ, разделяя регулярную составляющую $\bar{m}_v(t)$ и стохастическую составляющую $D_v(t)$.

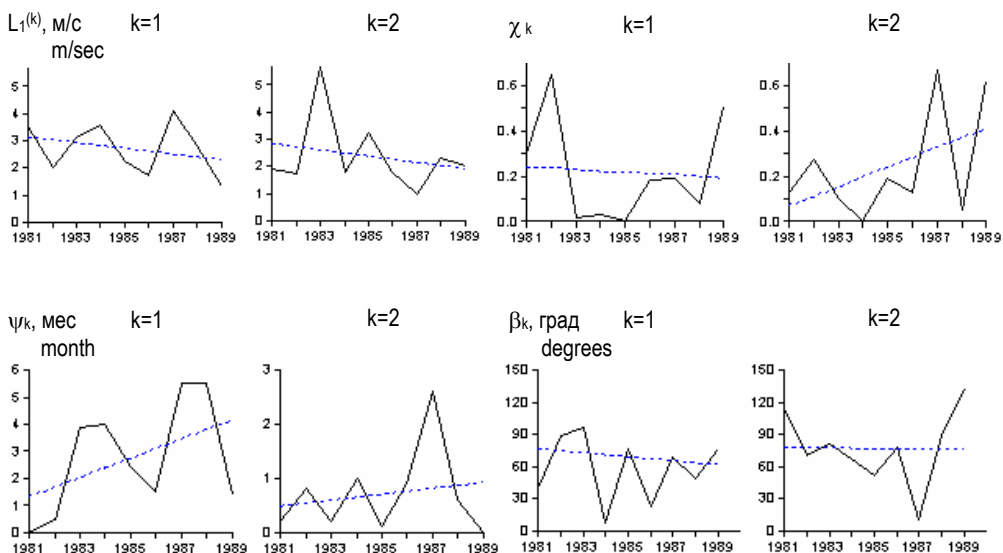
В качестве индикатора годовой ритмики использована оценка $S_{\bar{v}}(\omega)$ по среднемесячным данным в стационарном приближении. (рис. 1а), которая в основных чертах совпадает с оценкой по исходным данным (рис. 1с, d) – годовая ритмика представлена пиками на частоте годовой и полугодовой гармоник примерно одинаковой высоты, на которых преобладает вращение противоположного направления.



a



b



c

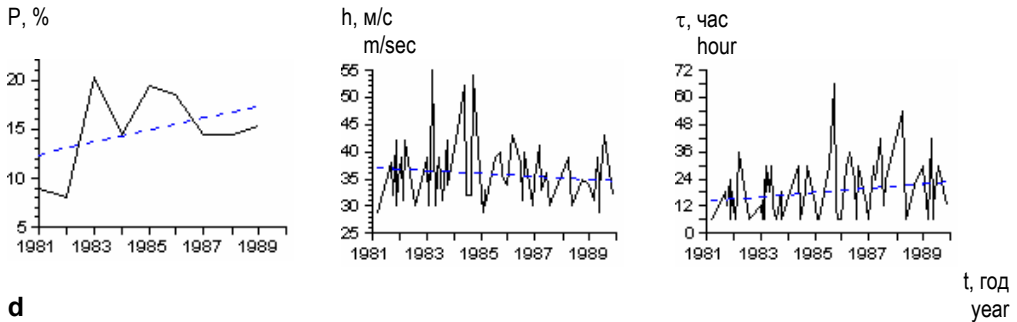


Рис. 2. Оценки вероятностных характеристик и трендов составляющих межгодовой изменчивости скорости ветра

а – ряды (1) и тренды (2) среднемесячной и среднегодовой скорости ветра; б – математическое ожидание скорости ветра и эллипсы среднеквадратического отклонения – вектор средней многолетней скорости (3), коэффициент тренда (4), эллипс среднеквадратического отклонения по среднесуточным данным (5), по среднемесячным или среднегодовым данным (6), относительно тренда (7); с – ряды и тренды параметров годового хода: длина большой оси $L_1^{(k)}$, вытянутость χ_k , фаза ψ_k и ориентация β_k эллипсов годовой ($k=1$) и полугодовой ($k=2$) гармоник; д – ряды и тренды общей повторяемости (P), интенсивности (h) и продолжительности (τ) индивидуальных штормов в мае

Fig. 2. Estimates of probabilistic characteristics and trends for components of inter-annual wind speed variability

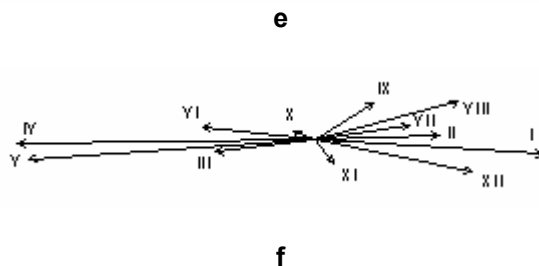
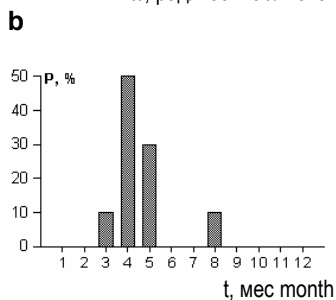
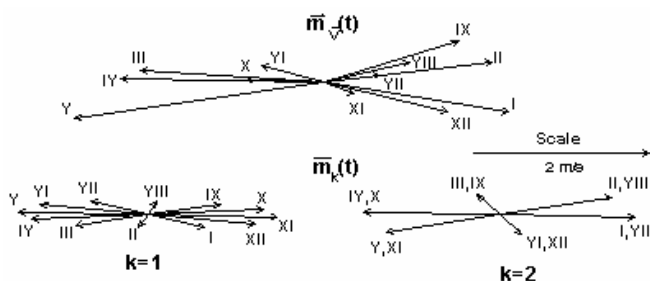
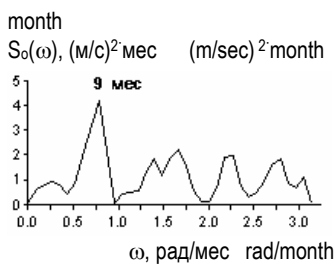
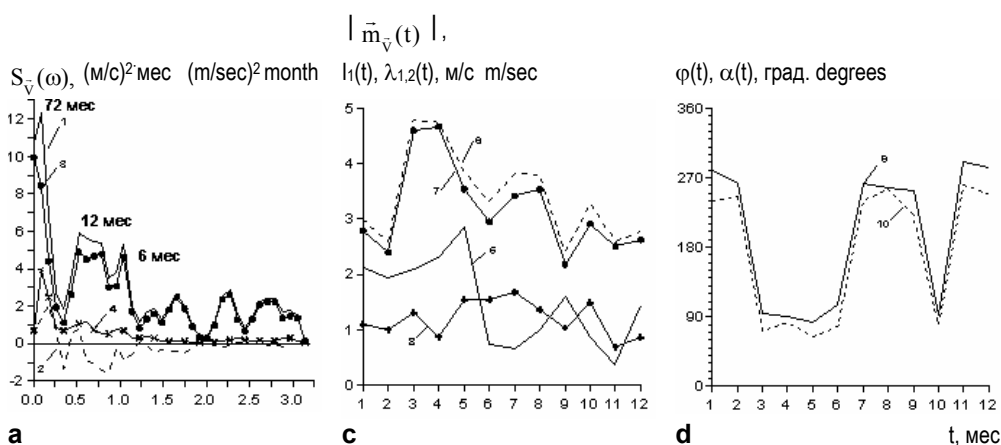
а – rows (1) and trends (2) for monthly mean and annual mean wind speed; б – mathematical expectation for wind speed and ellipses of mean square deviation – vector of mean multiyear wind speed (3); trend coefficient (4); ellipse of mean square deviation from daily means (5), from monthly means and from annual means (6), relative to trend (7); с – rows and trends for annual course parameters: length of major axis $L_1^{(k)}$, compression χ_k , phase ψ_k and orientation β_k for ellipses of annual and semi-annual harmonics; д – rows and trends for common frequency (P), intensity (h) and duration (τ) of storms in May

Когерентные оценки годового хода модуля и направления вектора $\vec{m}_{\vec{v}}(t)$ и инвариантов тензора $\mathbf{D}_{\vec{v}}(t)$ приведены на рис. 1 с, d. Годовой ход $|\vec{m}_{\vec{v}}(t)|$ в приближении периодически коррелированного случайного процесса имеет 2 максимума – так же, как у исходных данных, а $\varphi(t)$ является западным или восточным в зависимости от месяца. На рис. 3е оценка $\vec{m}_{\vec{v}}(t)$ представлена годографом, огибающая которого имеет сложную петлеобразную форму. В табл. 3 приведены параметры разложения (4) векторной кривой $\vec{m}_{\vec{v}}(t)$. Из нее следует, что регулярная ритмика определяется прежде всего годовой ($k=1$) и полугодовой ($k=2$) гармониками, годографы которых также приведены на рис. 3е. Эллипсы $\vec{m}_k(t)$ сильно вытянуты, ориентированы вдоль широты, в $\vec{m}_1(t)$ происходит вращение по часовой стрелке, а в $\vec{m}_2(t)$ против часовой стрелки. Отметим, что $\vec{m}_2(t)$ несколько превосходит $\vec{m}_1(t)$ по амплитуде. Аппроксимация $\vec{m}_{\vec{v}}(t)$ компонентами $\vec{m}_1(t)$ и $\vec{m}_2(t)$ (рис. 1е) показывает, что уже две первые гармоники удовлетворительно воспроизводят основные особенности регулярного годового хода.

В стационарном приближении все процессы по определению рассматриваются как стохастические. Амплитуду $A(\omega_0)$ их колебаний в полосе частот $\delta\omega$ в окрестности ω_0 можно оценить по спектральной плотности $S(\omega)$ как (Боков и др. 1993) $A(\omega_0) = \sqrt{2\delta\omega S(\omega_0)}$. Сопоставление этой оценки по рис. 3а с оценками амплитуды регулярных колебаний $L_{1,2}^{(k)}$ показало, что регуляр-

ные годовые и полугодовые колебания объясняют около 80 % дисперсии колебаний в соответствующих частотных диапазонах. Столь значительное регулярное полугодовое колебание является важной отличительной особенностью режима ветра в рассматриваемом районе.

Когерентные оценки инвариантов периодического тензора $\mathbf{D}_{\bar{v}}(t)$ приведены на рис. 3с,d. Годовой ход определяет в основном изменчивость большой оси эллипса дисперсии $\lambda_1(t)$, его форма сложнее, чем у дисперсии исходных данных, т.к. он имеет 3 максимума – главный в марте и вторичные в августе и октябре. В течение всего года эллипс $\mathbf{D}_{\bar{v}}(t)$ сильно вытянут, ориентация его большой оси близка к направлению среднего переноса $\varphi(t)$. На рис. 3б приведена оценка нулевого спектрального компонента (β), из которой следует, что после центрирования на $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{v}}(t)$ пики на частотах годовой и полугодовой гармоник исчезают, а сохраняющееся в спектре колебание с периодом 8-10 месяцев может быть связано с выборочной изменчивостью.



- | | |
|--|--|
| 1 – линейный инвариант $I_1(\omega)$, | 1 – linear invariant $I_1(\omega)$, |
| 2 – индикатор вращения $D(\omega)$, | 2 – rotation indicator $D(\omega)$, |
| 3 – большая ось $\lambda_1(\omega)$, | 3 – major axis $\lambda_1(\omega)$, |
| 4 – малая ось $\lambda_2(\omega)$, | 4 – minor axis $\lambda_2(\omega)$, |
| 5 – модуль среднемесячной скорости ветра $ m(t) $, | 5 – monthly mean wind speed module $ m(t) $, |
| 6 – линейный инвариант $[I_1(t)]^{0.5}$ тензора дисперсии, | 6 – linear invariant $[I_1(t)]^{0.5}$ of dispersion tensor, |
| 7,8 – инварианты $\lambda_{1,2}(t)$ тензора среднего квадратического отклонения, | 7,8 – invariants $\lambda_{1,2}(t)$ of mean square deviation tensor, |
| 9 – направление среднемесячной скорости ветра $\varphi(t)$, | 9 – monthly mean wind speed direction $\varphi(t)$, |
| 10 – ориентация эллипса $\alpha(t)$ | 10 – ellipse orientation $\alpha(t)$ |

Рис. 3. Оценки вероятностных характеристик годовой ритмики среднемесячной скорости ветра в стационарном приближении и в приближении периодически коррелированного случайного процесса:

- a – инварианты спектрального тензора в стационарном приближении; b – линейный инвариант нулевого спектрального компонента; c – годовой ход модуля математического ожидания и инвариантов тензора среднего квадратического отклонения; d- годовой ход направления математического ожидания скорости ветра и ориентации эллипса среднего квадратического отклонения; e - годограф годового хода математического ожидания $\bar{m}_v(t)$ и его годовая (k=1) и полугодовая (k=2) гармоники $\bar{m}_k(t)$;
- f – аппроксимация $\bar{m}_v(t)$ годовой и полугодовой гармониками; g – повторяемость P, % по месяцам годовых максимумов среднемесячной скорости ветра

Fig. 3. Estimates of annual rhythmic characteristics of monthly mean wind speed probabilistic characteristics for stationary approach and for periodic correlated stochastic process approach:

- a – spectral tensor invariants for stationary approach; b – linear invariant of zero spectral component; c – annual course of mathematical expectation module and of invariants of mean square deviation tensor; d- annual course of wind speed direction mathematical expectation and of orientation of mean square deviation ellipse; e – hodograph of annual course of mathematical expectation $\bar{m}_v(t)$ and its annual (k=1) and semi-annual (k=2) harmonics $\bar{m}_k(t)$; f – approximation of $\bar{m}_v(t)$ by annual and semi-annual harmonics; g – frequency P, % per month of mean monthly wind speed annual maximum

Для анализа эволюции модуляции во времени используем разложение (4) исходных данных на годовых отрезках. Квантили параметров разложения приведены в табл. 6, из которой следует, что все параметры всего за 10 лет изменялись в широких пределах. Особенно сильно изменялись длины большой $L_1^{(k)}$ и малой $L_2^{(k)}$ полуосей эллипсов годовой (k=1) и полугодовой (k=2) гармоник. Ширина интерквартильного расстояния Q межгодовых изменений $L_1^{(1)}$ и $L_1^{(2)}$ примерно одинакова, внутри него (а также для 25 % аномально малых значений) выполняется условие $L_1^{(1)} > L_1^{(2)}$. Размах R межгодовых изменений $L_1^{(2)}$ в 1.7 раза больше, чем размах $L_1^{(1)}$, для аномально больших значений выполняется условие $L_1^{(1)} < L_1^{(2)}$. Заметно меняется от года к году и соотношение длин $L_1^{(k)}$ и $L_2^{(k)}$, ширина Q и R параметра χ_k при k = 1 и при k = 2 примерно одинакова, в 75 % $\chi_k < 0,3$, однако в отдельные годы χ_k достигал значения 0.65. Отметим, что сильно изменяется от года к году спектральный состав годового хода - медиана параметра μ_k составляет примерно 0,35 при k = 1 и 0.25 при k = 2, что значительно меньше, чем у регулярного годового хода $\bar{m}_v(t)$ (табл. 5), а в отдельные годы вклад в результирующий годовой ход уменьшался до 20 % при k = 1 и до 5 % при k = 2. Интересно, что заметно изменяется и ориентация β_k эллипсов годового и полугодового колебаний (причем $Q_{\beta 1} > Q_{\beta 2}$, но $R_{\beta 1} > R_{\beta 2}$), и направление

обхода (в 8 случаях за 10 лет отмечалось вращение против часовой стрелки как при $k = 1$, так и при $k = 2$, хотя $\bar{m}_1(t)$ регулярного годового хода обходит эллипс по часовой стрелке).

Временные ряды параметров разложения (4) и их аппроксимация линейным трендом приведены на рис. 2с, а параметры тренда даны в табл. 5. Из них следует, что из-за очень сильных междугодовых изменений параметров при малой длине ряда идентификация тенденций межгодовой изменчивости как трендов неочевидна даже в тех случаях, когда его формальная оценка объясняет около 25 % дисперсии. Все тренды незначимы на 95 % уровне.

Таблица 4 – Table 4

Годовой и суточный ход максимальной скорости ветра
Annual and diurnal course of maximal wind speed values

Месяц Month	Срочные данные, срок 6-hourly data, time										Средне- месячные данные Monthly mean	
	Ночь Night		Утро Morning		День day		Вечер Evening		Сутки daily mean		V	φ
	V	φ	V	φ	V	φ	V	φ	V	φ		
	м/с m/sec	град deg.	м/с m/sec	град deg.	м/с m/sec	град deg.	М/с m/sec	Град deg.	м/с m/sec	град deg.	м/с m/sec	град deg.
I	39	90	35	80	38	100	37	90	34.1	95	12.7	76
II	35	80	37	80	33	80	38	80	30.4	76	11.7	84
III	60	90	60	90	57	90	58	90	57.0	90	19.2	95
IV	60	90	55	80	60	90	60	90	53.8	90	20.6	90
V	53	100	55	90	52	90	54	90	47.3	90	18.6	87
VI	46	75	49	90	49	120	52	90	39.6	89	15.9	85
VII	41	70	47	70	49	80	49	130	42.3	80	15.0	85
VIII	46	100	43	80	44	100	52	90	40.5	80	15.1	94
IX	54	110	51	125	47	115	42	90	46.7	115	11.0	80
X	53	85	52	90	45	90	46	90	45.3	80	16.3	84
XI	40	90	39	80	47	90	40	90	34.0	90	14.0	81
XII	41	80	49	90	42	80	46	70	40.9	86	11.4	80

На рис. 3г приведена диаграмма повторяемости P годовых максимумов среднемесячных значений $|\bar{m}_v|$. Годовой ход $P(t)$ согласуется с годовым ходом $\bar{m}_v(t)$ – максимальные средне-месячные значения скорости отмечались только с марта по май и в августе, максимум $P(t)$ приходится на апрель.

Наиболее значимой является изменчивость синоптического масштаба, объясняющая более 50 % дисперсии (табл. 1). Общая характеристика ее сезонной модуляции и межгодовой изменчивости дана в терминах инвариантов тензор-функции внутримесячной дисперсии $D_v^{(m)}(t)$, срочных значений $\bar{V}^o(t)$, центрированных на средние годовые значения и годовой ход. Графики временных (по месяцам t) рядов инвариантов $\lambda_{1,2}(t)$ приведены на рис. 4а. Из этого рисунка следует, что при всех t выполняется неравенство $\lambda_1(t) \gg \lambda_2(t)$, ряд $\lambda_1(t)$ можно рассматривать как реализацию ПКСП с годовой ритмикой, параметры которой сильно изменяются от года к году. Расчет показал, что почти всегда $\alpha(t) \cong 90^\circ$ и никогда не выходит за границы интервала $70 \div 120^\circ$.

Таблица 5 – Table 5

Оценки параметров компонентов среднего многолетнего годового хода скорости ветра $\bar{m}_v(t)$, инвариантов тензора внутримесячной дисперсии $D_v^{(m)}(t)$ и повторяемости штормов $P(t)$

Estimates of parameters for mean multiyear wind speed course $\bar{m}_v(t)$, of invariants for intra-monthly dispersion tensor $D_v^{(m)}$ and storm frequency $P(t)$

Параметры гармоник $\bar{m}_k(t)$ Parameters of harmonics $\bar{m}_k(t)$								Амплитуда a_k и фаза ψ_k Amplitude a_k and phase ψ_k					
								$D_v^{(m)}(t)$				$P(t)^{***}$	
								$\lambda_1^{(k)}$		χ_k			
k	$L_1^{(k)}$	$L_2^{(k)}$	ψ_k^*	β_k^*	μ_k	χ_k	sp ^{**}	a_k	ψ_k	a_k	ψ_k	a_k	ψ_k
	м/с m/sec	м/с m/sec	месяц month	градус degree	-	-		м ² /с ² m ² /sec ²	месяц month	-	месяц month	%	месяц month
0	-	-	-	-	-	-	-	117.6	-	0.24	-	8.7	-
1	1.47	0.15	3.9	91	0.42	0.10	+	23.1	5.7	0.03	6.3	4.5	5.3
2	1.65	0.24	3.4	88	0.55	0.15	-	15.2	3.3	0.01	5.7	2.6	3.4
3	0.32	0.09	4.1	100	0.02	0.28	-	2.9	1.6	0.01	3.7	0.3	3.3
4	0.14	0.09	1.5	61	0.01	0.64	-	5.1	1.0	0.01	2.3	0.6	2.7

Примечание:

* Из двух возможных значений фазы $\psi_k \pm T_k$ и ориентации $\beta_k \pm 180^\circ$ векторной гармоники приняты относящиеся к первой половине периода T_k ($T_1=12, T_2=6, T_3=4, T_4=3$ мес.) для ψ_k или к сектору $0 \div 180^\circ$ для β_k . Фаза здесь и далее приведена в месяцах от 0 (январь) до 11 (декабрь).

** Здесь и в табл. 6 sp – направление обхода эллипса по часовой стрелке (+) или против часовой стрелки (-).

*** Внутримесячная повторяемость штормов определена как отношение количества сроков с $V > 28$ м/с к общему числу сроков.

Comment:

* From two possible estimates of phase $\psi_k \pm T_k$ and orientation $\beta_k \pm 180^\circ$ of vector harmonic there are chosen ones for first half of period T_k ($T_1=12, T_2=6, T_3=4, T_4=3$ months) for ψ_k or for sector $0 \div 180^\circ$ for β_k . Phase (here and below) is presented as months from 0 (January) to 11 (December).

** Here and in Table 6 sp is direction of clockwise (+) or counter clockwise (-).

*** Intra-monthly frequency of storms is defined as relationship of number of cases with $V > 28$ m/sec to total observations.

В табл. 5 приведены оценки амплитуд a_k и фаз ψ_k компонентов регулярного годового хода $m_{\lambda_1}(t)$, из которой видно, что он почти полностью определяется годовой и полугодовой гармониками, причем $a_1 > a_2$ в 1,7 раза, ψ_1 приходится на зиму, ψ_2 приходится на переходные сезоны. Параметры годового хода инварианта χ показывают, что в регулярном годовом ходе $D_v^{(m)}(t)$ отношение $\lambda_2(t)/\lambda_1(t)$ составляет в среднем за год около 0,25 и почти не изменяется от месяца к месяцу. На рис. 3b годовая ритмика $D_v^{(m)}(t)$ представлена квантилями межгодовой изменчивости $\lambda_1(t)$ по месяцам. Из анализа рис. 3 следует, что годовым ход параметров ветрового режима несимметричен и характеризуется усилением изменчивости в холодный и переходные сезоны.

В табл. 6 приведены оценки параметров тренда $\lambda_1(t)$ по месяцам и в среднем за год. В годовом ходе наклон тренда является знакопеременным, а его дисперсионный вклад в большинстве месяцев не превышает 10 %. Оценки трендов параметров разложения $\lambda_1(t)$ в ряд Фурье на

годовых отрезках приведены в табл. 7, из которой следует тенденция к упрощению спектра годового хода. В период с 1980 по 1990 гг. амплитуда годовой гармоники имела положительный тренд, а амплитуда полугодовой гармоники - отрицательный. Все оценки трендов в табл. 7-8 статистически незначимы на 95 % уровне. Расчет показал, что дисперсия процессов синоптического масштаба более чем на 80 % обусловлена сезонной модуляцией.

Таблица 6 Table 6

Оценки квантилей и экстремумов характеристик модуляционной составляющей межгодовой изменчивости скорости ветра и компонентов годового хода повторяемости штормов

Estimates of quantiles and extremes for interannual variability characteristics and of components of storm frequency annual course

Параметр – Parameter	k	X _{min}	X _{0.25}	X _{0.50}	X _{0.75}	X _{max}	Q	R	
Параметры годовой (k=1) и полугодовой (k=2) гармоник годового хода скорости ветра Parameters of annual (k=1) and semi-annual harmonics of wind speed annual course									
L ₁ ^(k) , м/с m/sec	1	1.34	2.04	2.82	3.53	4.09	1.49	2.75	
	2	1.00	1.76	1.89	2.29	5.68	0.53	4.68	
L ₂ ^(k) , м/с m/sec	1	0.01	0.10	0.32	0.77	1.33	0.67	1.32	
	2	0.00	0.24	0.46	0.61	1.25	0.37	1.25	
ψ _k ± 0.5T _k , месяц month	1	0.0	1.4	2.4	4.0	5.5	2.6	5.5	
	2	0.0	0.2	0.6	0.9	2.6	0.7	2.6	
β _k ± 180, градусы degrees	1	22	49	76	88	108	39	86	
	2	10	67	78	88	133	21	123	
μ _k	1	0.21	0.27	0.37	0.38	0.77	0.11	0.56	
	2	0.06	0.14	0.25	0.53	0.71	0.39	0.65	
χ _k	1	0.00	0.03	0.18	0.30	0.65	0.27	0.65	
	2	0.00	0.10	0.13	0.27	0.67	0.17	0.67	
sp _k , %	1	sp(+)=20				sp(-)=80			
	2	sp(+)=20				sp(-)=80			
Амплитуда (a _k) и фаза (ψ _k) компонентов годового хода инвариантов тензора внутримесячной дисперсии и повторяемости штормов (P) Amplitude (a _k) and phase (ψ _k) for annual course components of intra-monthly dispersion tensor invariants and storm frequency (P)									
λ ₁ ^(k)	a _k , м ² /с ² m ² /с ²	0	106.26	109.53	111.66	121.86	145.86	12.33	39.60
		1	2.90	16.37	27.41	36.70	49.30	20.33	46.40
		2	5.27	13.43	15.96	25.59	47.09	12.16	41.82
	ψ _k , мес month	1	2.4	5.5	6.12	6.2	8.3	0.7	5.9
2		0.9	2.7	3.2	3.5	4.2	0.8	3.3	
χ _k	a _k	0	0.20	0.22	0.25	0.25	0.31	0.03	0.11
		1	0.01	0.02	0.04	0.06	0.10	0.04	0.09
		2	0.00	0.01	0.02	0.03	0.06	0.02	0.06
	ψ _k , мес month	1	0.0	5.9	6.6	7.2	7.7	1.3	7.7
2		0.9	1.6	1.9	3.7	4.9	2.1	4.0	
P _k	a _k , %	0	6.2	7.1	8.8	9.6	13.1	2.5	6.9
		1	1.6	2.7	5.3	6.2	9.3	3.5	7.7
		2	0.9	3.0	3.7	5.1	7.9	2.1	7.0
	ψ _k , мес month	1	3.0	5.1	5.5	5.8	6.8	0.7	3.8
2		0.1	3.0	3.2	3.8	5.5	0.8	5.4	

Таблица 7 – Table 7

Оценки наклона A тренда и дисперсионного вклада аномалий относительно тренда D_g/D (%) параметров модуляционной составляющей межгодовой изменчивости скорости ветра и годового хода повторяемости штормов

Estimates of trend parameter A and dispersion input of anomalies relative to trend D_g/D (%) of wind speed inter-annual variability parameter and storm frequency annual course

k	Параметры компонентов – Parameters of $\vec{m}_k(t)$ components							
	$L_1^{(k)}$, м/с m/sec		χ_k		ψ_k , месяц month		β_k , град degrees	
	A	D_g/D , %	A	D_g/D , %	A	D_g/D , %	A	D_g/D , %
1	-0.105	91	-0.006	99	0.36	78	-1.9	97
2	-0.118	85	0.043	77	0.06	96	-0.1	99
Амплитуда a_k и фаза ψ_k компонентов годового хода инвариантов тензора внутримесячной дисперсии и повторяемости штормов (P) Amplitude (a_k) and phase (ψ_k) of annual course components of intra-monthly dispersion tensor invariants and storm frequency (P)								
k	$\lambda_{11}^{(k)}$				P_k , %			
	a_k		ψ_k		a_k		ψ_k	
	A	D_g/D , %	A	D_g/D , %	A	D_g/D , %	A	D_g/D , %
0	0.03	100	-	-	0.25	90	-	-
1	1.47	94	-0.05	99	0.28	90	0.21	77
2	-2.89	68	0.06	97	-0.28	88	0.24	80

Особый интерес представляют оценки сильных и штормовых ветров. В табл. 9 приведена оценка повторяемости по румбам и месяцам скорости ветра 10 % обеспеченности ($|\vec{V}| > 28$ м/с, что почти совпадает с критерием особо опасного явления – $|\vec{V}| \geq 30$ м/с). Из табл. следует, что 99,6 % штормовых ветров имеют восточную составляющую, причем в восточный сектор (при градации по 8 румбам) попадает более 90 %. Повторяемость штормов P усилена в холодный и переходные сезоны, главный максимум приходится на март-май, а вторичный максимум на октябрь. Параметры среднего многолетнего годового хода $m_T(t)$ приведены в табл. 5. Большое сходство годового хода $m_{\lambda_1}(t)$ тензора $D_{\vec{V}}^{(m)}(t)$ и $m_T(t)$ позволяет считать, что внутримесячная дисперсия в большой мере обусловлена аномально сильным ветром.

В табл. 6 приведены оценки квантилей параметров разложения $P(t)$ в ряд Фурье на годовых отрезках, указывающие на сильную межгодовую изменчивость среднегодовых значений и амплитуд годовой и полугодовой гармоник при относительно стабильных фазах (особенно у годовой гармоники). Оценки параметров тренда $P(t)$ по месяцам и в среднем за год приведены в табл. 8. Для всех месяцев (кроме марта и ноября) и в среднем за год отмечается тенденция к увеличению повторяемости штормов с 1980 по 1990 гг., однако вклад трендовой составляющей, статистически незначимой на 95 % уровне, почти во все месяцы менее 20 %. Ряд значений $P(t)$ для мая и его аппроксимация трендом приведен на рис. 2d. Из анализа этого рисунка следует, что из-за сильной выборочной изменчивости указанные тенденции не могут быть однозначно идентифицированы как тренд.

Дальнейший анализ выполним в терминах параметров модели случайного импульсного процесса (Рожков 2001) – количества N , мощности h и продолжительности τ выбросов $|\vec{V}^o|$ за

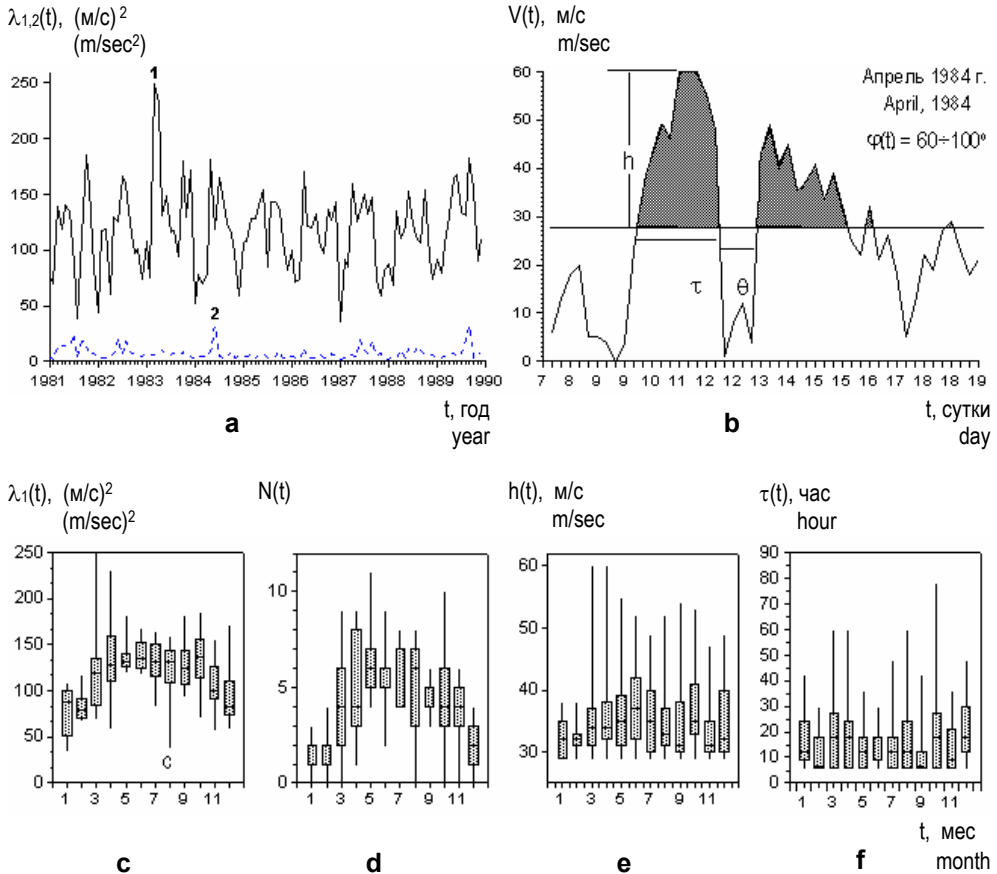


Рис. 4. Оценки вероятностных характеристик изменчивости скорости ветра в синоптическом масштабе:

- a – ряды длин большой λ_1 (1) и малой λ_2 (2) полуосей эллипса внутримесячной дисперсии;
- b – параметры случайного импульса; c–f – годовой ход квантилей межгодовой изменчивости λ_1 , количества N , интенсивности h и продолжительности τ штормов

Fig. 4. Estimates of probabilistic characteristics of wind speed variability in synoptic scale:

- a – time-series of major λ_1 (1) and minor λ_2 (2) semi-axis length intra-monthly dispersion ellipse;
- b – probabilistic impulse parameters; c–f – annual course of λ_1 interannual variability quantiles, number N , intensity h and storm duration τ

уровень 10% обеспеченности – рис. 4b. Оценки квантилей N , h и τ по месяцам приведены на рис. 4d, e. Основные свойства годовой ритмики $N(t)$ в целом совпадают с $P(t)$. У параметра $h(t)$ годовая ритмика хотя и заметна, но не столь отчетлива – она проявляется прежде всего в годовом ходе 25 % наиболее мощных выбросов, показанных на рис. 4e верхним «усом» «ящика с усами» (Рожков 1996). Еще менее четко выражена годовая ритмика параметра $\tau(t)$. Рис. 4f показывает, что 75 % штормов имеют продолжительность в зависимости от месяца не более 6÷30 часов (2–5 сроков измерений). Наиболее аномальные по продолжительности шторма отмечались марте, апреле и августе (60 часов – 10 сроков измерения) и в октябре (78 часов – 13

сроков измерения). Отметим, что наиболее сильные ветры характерны для продолжительных штормов, поскольку корреляция между h и τ составляет $r = 0.85$.

Оценки параметров тренда по месяцам и за год приведены в табл. 8 и на рис. 2г, они указывают на стационарный (по математическому ожиданию) характер межгодовой изменчивости $h(t)$ и $\tau(t)$.

Таблица 8 – Table 8

Оценки наклона A тренда и дисперсионного вклада аномалий относительно тренда D_g/D (%) инвариантов тензора внутримесячной дисперсии $D_V^{(m)}(t)$ скорости ветра, повторяемости (P), интенсивности (h) и продолжительности (τ) штормов

Estimates of trend parameter A and dispersion input of anomalies relative to trend D_g/D (%) of invariants of intramonthly dispersion $D_V^{(m)}(t)$ tensor of wind speed, frequency (P), intensity (h) and duration (τ) of storms

Месяц Month	$D_V^{(m)}(t)$, $\lambda_1, (m/c)^2 - (m/sec)^2$		Штормовая активность – Storm activity					
			P, %		h, m/c – m/sec		τ , час – hours	
	A	$D_g/D, \%$	A	$D_g/D, \%$	A	$D_g/D, \%$	A	$D_g/D, \%$
I	1.62	97	0.18	97	<0.1	100	<1	99
II	-1.40	95	0.13	97	<0.1	100	<1	100
III	-6.70	88	-1.47	76	<0.1	97	<1	95
IV	2.42	98	1.27	85	<0.1	97	<1	100
V	0.05	100	0.62	84	<0.1	99	<1	97
VI	3.02	76	0.28	96	<0.1	100	<1	92
VII	1.60	98	0.85	83	<0.1	96	<1	97
VIII	3.46	93	0.54	90	<0.1	98	<1	96
IX	5.24	74	0.70	69	<0.1	95	<1	86
X	-2.35	97	0.08	88	<0.1	100	<1	96
XI	-6.61	57	-0.32	89	<0.1	97	<1	98
XII	0.16	100	0.17	99	<0.1	100	<1	99
Год – Year	0.03	100	0.25	90	<0.1	100	<1	100

Выводы

Векторно-алгебраический метод, адекватно описывающий совместную изменчивость модуля и направления скорости ветра, позволил существенно детализировать представления о синоптической изменчивости скорости приземного ветра. Неучет синоптических колебаний приводит почти к двукратному занижению дисперсии, даже в районах, где наблюдается устойчивые по направлению ветровые потоки. Значительная синоптическая изменчивость скорости ветра в районе станции Русская, приводящая к формированию штормовых условий, обусловлена взаимодействием систем циклонической циркуляции с локальными стоковыми переносами и орографией и имеет выраженную сезонную модуляцию.

Наиболее выраженными особенностями ветрового режима в районе антарктической станции Русская является преобладание ветров восточной четверти и большая повторяемость сильных и штормовых ветров, причем все сильные ветры имеют восточную составляющую. Особенности годового хода и межгодовой изменчивости скорости ветра формируются процессами синоптического масштаба, которые ответственны более чем за 50 % общей дисперсии.

Таблица 9 – Table 9

Повторяемость штормов 10% обеспеченности* по месяцам и по румбам
Intra-annual distribution of storm frequency (10% provision*)

Месяц Month	Румб – Rhumb								Всего Total
	С N	СВ NE	В E	ЮВ SE	Ю S	ЮЗ SW	З W	СЗ NW	
I	-	-	2.7	-	-	-	-	-	2.7
II	-	-	1.8	-	-	-	-	-	1.8
III	-	0.5	8.5	-	-	-	-	-	9.0
IV	0.1	0.4	11.2	0.2	-	-	-	-	11.9
V	0.1	0.8	12.9	0.8	-	-	-	-	14.6
VI	-	0.3	10.2	1.3	0.1	-	-	-	11.9
VII	-	0.8	8.7	0.4	-	-	-	-	9.9
VIII	-	0.4	9.0	0.1	-	-	-	-	9.5
IX	0.1	0.5	6.7	0.7	-	-	-	-	8.0
X	-	0.3	9.9	0.6	-	-	-	-	10.6
XI	-	0.1	5.5	-	-	-	-	-	5.6
XII	-	0.1	4.4	-	-	-	-	-	4.5
Всего Total	0.3	4.2	91.3	4.1	0.1	-	-	-	100

Примечание к таблице. * 10 % обеспеченности соответствует скорость ветра с модулем $V > 28$ м/с, повторяемость определена как отношение количества сроков с $V > 28$ м/с к общему числу сроков

Comment: * wind speed with module $V > 28$ m/sec has 10 % provision, storm frequency is calculated as ratio of cases with $V > 28$ m/sec relative to number of total observations

Использованный в работе подход к анализу параметров ветрового режима в Антарктиде следует использовать при изучении механизмов формирования климатической изменчивости, тенденций современных изменений климата и оценки вероятности появления экстремальных и особо опасных погодных явлений в регионе.

Данное исследование поддержано подпрограммой "Изучение и исследование Антарктики" Федеральной целевой программы "Мировой океан" Российской Федерации.

Литература

- Алексеев Г.В., Бухановский А.В., Иванов Н.Е., Рожков В.А., 1999, Распределение годовых экстремумов температуры воздуха. Известия РГО, 4: 26–30.
- Белышев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А., 1983, Вероятностный анализ морских течений. Гидрометеоздат, Ленинград: 264 с.
- Боков В.Н., Бухановский А.В., Иванов Н.Е., Рожков В.А., 2001, Пространственно-временная изменчивость поля ветра в умеренных широтах Северного полушария. Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 37 (5): 170–181.
- Боков В.Н., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А., 1993, Оценки межгодовой изменчивости скорости ветра над морем. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 29 (3): 253–289.
- Драган Я.П., Рожков В.А., Яворский И.Н., 1987, Вероятностный анализ ритмики океанологических процессов. Гидрометеоздат, Ленинград: 319 с.
- Дрейпер Н., Смит Г., 1986, Прикладной регрессионный анализ. Москва, Финансы и статистика, т. 1: 366 с.

- Иванов Н.Е., Рожков В.А., 1994, Вероятностный анализ ритмики векторных гидрофизических процессов. Измерительная техника, 1: 48–51.
- Иванов Н.Е., Рожков В.А., 1996, Компонентное описание ритмики гидрометеорологических процессов. Известия СПб ГУ, 2(14): 66–74.
- Колосова Н.В. 1982, Структура приземного ветра в Антарктиде. Гидрометеоиздат, Ленинград: 174 с.
- Данилов А.И., Лагун В.Е., Клепиков А.В., Катцов В.М., Вавулин С.В., 2003, Текущие изменения климата Антарктики и сценарии его будущих изменений. Арктика и Антарктика. Москва, Наука, 2 (36): 114–125.
- Лагун В.Е., Иванов Н.Е., 2001, О статистической структуре поля приземной температуры воздуха и давления на уровне моря в районе Антарктического полуострова (по данным российской станции Беллинсгаузен). Квартальный бюллетень РАЭ, 4 (17): 32–38 (<http://south.aari.nw.ru>).
- Лагун В.Е., Иванов Н.Е., Яговкина С.В., 2006, К вопросу о потеплении в районе Антарктического полуострова. Problemy Klimatologii Polarnej, 14: 23–46.
- Рожков В.А., 1996, Теория вероятностей случайных событий, величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб, Прогресс-Погода: 559 с.
- Рожков В.А., 2001, Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Книга 1. СПб, Гидрометеоиздат, Ленинград: 340 с.
- Справочник по климату Антарктиды. 1981, Т. 3. Л., Гидрометеоиздат, Ленинград: 272 с.
- Kruszewski G., 2006, Zmiany składowej strefowej predkości wiatru (U-wind) w rejonie Spitsbergenu Zachodniego (1981-2005). Problemy Klimatologii Polarnej, 16: 107–114.
- Ivanov N.E., Lagun V.E., 2004, Study of statistical structure of surface wind speed vector in Western Antarctica. Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/ JSC Working Group on Numerical Experimentation Report (Ed. Ritchie H.), N 34, WMO/TD, 2-03-2-04, www.cmc.ec.gc.ca/rpn/wgne/2004/document/02_Nikolay_Ivanov_windspeed.pdf.
- Turner J., Colwell S.R., Marshall J., Lachlan-Cope T., Carleton A.M., Jones P.D., Lagun V.E., Reid P.A., Iagovkina S., 2004, The SCAR READER project: Towards a high-quality data base of mean Antarctic meteorological observations. Journal of Climate, 17 (14): 2890–2898.
- Turner J., Colwell S.R., Marshall J., Lachlan-Cope T., Carleton A.M., Jones P.D., Lagun V.E., Reid P.A., Iagovkina S., 2005, Antarctic climate change during the last 50 years. International Journal of Climatology, 25 (2): 279–294.
- Van Lipzig N.P.M., Turner J., Colwell S.R., Van Den Broeke M.R., 2004, The near-surface wind field over the Antarctic continent. International Journal of Climatology, 24 (15): 1973–1982.

Summary

Statistical analysis of surface wind velocity is executed on the base of current observations (six-hourly) at Russkaya station, located in Western Antarctic for period from 1980 to 1990. Estimates of inter-annual variability parameters, parameters of annual rithmics, processes of synoptic scale and diurnal variability with account of low frequency modulation are obtained in terms of mathematics expectance vector and of invariant of dispersion tensor and spectral density in suggestion of stationary and periodic correlation vector stochastic process. For parameterization of synoptic scale variability the model of stochastic impulse process is applied as consequence of “storms” and “weather windows”. “Storm” is defined as an excess of wind regime parameter values over defined level, and “weather windows” are the intervals between two consequed storms. For synoptic events statistics description

there are formed time-series of storm intensity characteristics, storms and weather windows durations. Threshold levels are prescribed on the base of quantile analysis or as a criteria of dangerous or especially dangerous parameters of wind regime. Synoptic variability based on time-series, centered on annual mean values and annual course of monthly mean values is analysed. Seasonal modulation and inter-annual variability of synoptic scale processes intensity by time-series of intra-monthly dispersion as realization of periodic correlated process are described.

O reżimie wiatru przyziemnego w Zachodniej Antarktyce

Streszczenie

Statystyczna analiza prędkości wiatru przyziemnego została przeprowadzona w oparciu o dane z obserwacji terminowych (4 razy w ciągu doby) przeprowadzonych na stacji Russkaya (Antarkyda Zachodnia). Wykorzystano szeregi obserwacyjne od 1980 do 1990 roku. Oceny parametrów zmienności międzyrocznej, rytmiki rocznej, procesów skali synoptycznej i przebiegu dobowego dokonano w kategoriach wektora oczekiwania matematycznego (przestrzeni probabilistycznej) i inwariantów tensorów dyspersji i gęstości spektralnej oraz korelacji okresowej wektorów procesu losowego. Dla parametryzacji zmienności skali synoptycznej wykorzystano model losowego procesu impulsowego w postaci kolejnych następstw „sztormów” i „okien pogody”. „Sztorm” oznacza przewyższenie zadanego poziomu prędkości wiatru, a „okno pogody” – odstęp czasu między dwoma kolejnymi sztormami. Dla opisanego zjawiska skali synoptycznej utworzono szeregi czasowe charakterystyk intensywności sztormów oraz czasu trwania sztormów i okien pogody. Poziomy progowe wyznaczono na podstawie analizy kwantyli jako kryteria graniczne niebezpiecznych lub szczególnie niebezpiecznych warunków pogodowych. Zmienność skali synoptycznej najbardziej celowo jest analizować w szeregach centrowanych względem wartości średnich rocznych oraz względem rocznego przebiegu wartości średnich miesięcznych. Modulację sezonową i zmienność międzyroczną intensywności procesów skali synoptycznej można opisać za pomocą szeregu czasowego dyspersji wewnątrzmięsięcznej prędkości wiatru, jako wyniku okresowych korelacji zachodzących w procesie losowym.