

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИМАТА РАЙОНА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ТИКСИ. ЧАСТЬ 2. ГОДОВОЙ ХОД

науч. сотр. Н.Е.ИВАНОВ,
д-р физ.-мат. наук А.П.МАКШТАС,
канд. физ.-мат. наук С.В.ШУТИЛИН

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@aari.nw.ru

На основе созданного ААНИИ и Тиксинским филиалом Якутского УГМС электронного архива данных стандартных метеорологических наблюдений, выполненных на полярной станции Тикси с августа 1932 по декабрь 2007 г., проанализированы особенности годового хода температуры воздуха, атмосферного давления, абсолютной влажности, балла общей облачности и скорости ветра. Анализ выполнен с использованием модели периодически коррелированного случайного процесса. Основное внимание обращено на сопоставление регулярного годового хода и межгодовой изменчивости его характеристик в параметрической форме.

Ключевые слова: гидрометеорологическая обсерватория Тикси, температура воздуха, атмосферное давление, абсолютная влажность, скорость ветра, облачность, годовой ход, аддитивная и модуляционная составляющие межгодовой изменчивости.

ВВЕДЕНИЕ

Статья является продолжением цикла начатых в [7] работ, посвященных описанию изменчивости характеристик климата в районе гидрометеорологической обсерватории в Тикси (ГМО), организованной в рамках Международного полярного года (Кластер 196). Основной задачей ГМО, созданной на базе метеорологической станции «Полярка», открытой 12 августа 1932 г., является проведение наблюдений, ориентированных на выявление причин и последствий изменений климата Арктики. В рамках подготовки к открытию обсерватории был сформирован электронный архив данных срочных метеорологических наблюдений, выполненных на ГМС «Полярка» в период с августа 1932 г. по 31 декабря 2007 г. Архив содержит данные наблюдений за более чем 27000 дней (864 месяца) и позволяет исследовать межгодовую изменчивость, годовой ход, изменчивость синоптического масштаба и суточный ход основных метеорологических элементов (МЭ).

Приведенные в работе [7] результаты выполненных на основе поддиапазонного статистического анализа исследований наиболее общих характеристик многолетней изменчивости основных МЭ показали особо важную роль годовой ритмики. Эта статья посвящена анализу одного из самых заметных ее проявлений – годовому ходу среднемесячных значений, при этом основное внимание обращено на уточнение его роли в общей структуре климатической изменчивости, а также на параметризацию годового хода с учетом межгодовой изменчивости. В отличие от работы [7], в которой был выполнен традиционный для климатических справочников анализ данных, сгруппированных за одноименные месяцы, здесь кривые годового хода рассматриваются как целостные образы.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Представим годовой ход среднемесячных значений МЭ временными рядами $\zeta(t_j)$, где $i = 1, 2, \dots, 12$ – месяц (быстрое время), $j = 1, 2, \dots, 72$ – год (медленное

время). В контексте общего поддиапазонного подхода, описанного в работе [7], первой задачей является оценка вклада процессов различного масштаба в общую дисперсию. Для этого использованы оценки дисперсии, рассчитанные по данным различного масштаба осреднения, спектральной плотности в стационарном приближении $S(\omega)$ и спектральной функции:

$$F(\omega) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega, \quad (1)$$

а также дисперсионный анализ ряда $\zeta(t)_j$. Отметим, что в работе [7] такой анализ с учетом структуры годового хода был выполнен только для температуры воздуха и приземного давления. В настоящей работе приведены результаты анализа по всему комплексу МЭ.

Годовой ход МЭ сочетает повторяемость с периодом $\theta = 1$ год, задаваемую астрономическим фактором – обращение Земли вокруг Солнца, и стохастическую изменчивость параметров годовых циклов. В качестве инструмента для описания изменчивости МЭ используется модель периодически коррелированного случайного процесса (ПКСП). Теория и методы оценивания вероятностных характеристик ПКСП изложены в работах [5, 9, 11]. В работах [1, 4, 8, 10] уточнены отдельные приемы оценивания и приведены многочисленные примеры таких оценок по натурным данным.

Периодически коррелированным называется процесс, вероятностные характеристики которого: математическое ожидание $m(t)$, дисперсия $D(t)$, среднеквадратическое отклонение $\sigma(t)$, корреляционная функция и спектральная плотность – остаются неизменными при сдвиге на целое число n периодов коррелированности (здесь $\theta = 1$ год). Оценки вышеуказанных характеристик:

$$m(t) = m(t + n\theta), \quad \sigma(t) \equiv D^{0.5}(t) = D^{0.5}(t + n\theta), \quad (2)$$

рассчитанные по отсчетам, взятым через θ , называют когерентными оценками ПКСП.

Такое определение предполагает предварительное центрирование среднемесячных данных на среднегодовые значения. Поэтому в ПКСП-приближении $\sigma(t)$ описывает отклонение j -го годового хода от регулярного годового хода $m(t)$. Эта составляющая изменчивости названа в [4] модуляционной составляющей (МС) межгодовой изменчивости в отличие от аддитивной составляющей (АС) – последовательности среднегодовых значений. Многочисленные оценки для внетропических широт показали, что $D_{MC} \gg D_{AC}$.

Для дисперсионного анализа используется разложение:

$$\zeta(t)_j = \bar{\zeta} + \bar{\zeta}_j + m(t_i) + \varepsilon(t_i)_j, \quad (3)$$

где $\bar{\zeta}$ – среднегодовое значение МЭ за весь период наблюдений, $\bar{\zeta}_j$ – ряд среднегодовых значений (АС), $m(t_i)$ – среднемноголетний годового ход среднемесячных значений, $\varepsilon(t_i)_j$ – остаток (МС).

Наиболее содержательным способом предварительного графического анализа, позволяющего определить тип МС, является совмещение на одном графике кривых $m(t)$ и $\sigma(t)$. При этом, если форма графиков $m(t)$ и $\sigma(t)$ близка к косинусоиду с периодом $\theta = 1$ год и они относительно друг друга синфазны либо противофазны, МС имеет вид амплитудной модуляции (АМ). В случае более сложной формы кривых и/или фазовых различий МС содержит еще и фазовую модуляцию и/или нерегулярные флуктуации.

Многочисленные оценки показывают, что кривые $m(t)$ и $\sigma(t)$ могут сильно различаться для различных МЭ и географических районов не только амплитудой и фазой, но и формой. Для придания этим качественным особенностям количественной определенности используются компонентные оценки на основе модели ряда среднемесячных значений $\zeta(t)$:

$$\zeta(t) = \sum_{k=1}^m \zeta_k(t) \exp(i\omega_k t), \quad (4)$$

где $\zeta_k(t)$ – стационарные компоненты с математическими ожиданиями m_k , дисперсиями D_k , ковариациями $K_k(t)$ и фазами $\omega_k = 2\pi k/\theta$.

По рядам $\zeta(t)$ оценки характеристик компонентов $\zeta_k(t)$, согласно работе [9], рассчитываются на основе когерентных оценок:

$$m_k = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta m(t) \exp(-i\omega_k t) dt, \quad \sigma_k = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \sigma(t) \exp(-i\omega_k t) dt. \quad (5)$$

Гармоники $\zeta_k(t)$ разложения (4) характеризуются амплитудами $a_k = \sqrt{a_{k,c}^2 + a_{k,s}^2}$ и фазами $\psi_k = \arctg(a_{k,s}/a_{k,c})$.

Компонентный метод предполагает априорное задание количества компонентов m в разложении (4). При описании годового хода двенадцатью среднемесячными значениями согласно теореме Котельникова верхним пределом является $m = 6$. Опыт показывает, что в большинстве случаев достаточно использовать 4 гармоники, а в наиболее простых случаях (температура и влажность воздуха) можно ограничиться годовой и полугодовой гармониками ($m = 2$).

Дисперсионный вклад годовой гармоники ($k = 1$) и ее обертонов ($k > 1$) с периодами $\theta_k = \theta/k$ в результирующий годовой ход определяют числа:

$$B_k = \frac{a_k^2}{\sum_k a_k^2}. \quad (6)$$

Соотношение интенсивностей АС и МС описывает спектральный коэффициент вариации

$$v_k = \sigma_k/m_k. \quad (7)$$

В настоящей работе для большей надежности выводов дисперсионный анализ модели ряда (3) был выполнен тремя методами. Вначале было проведено сравнение спектра $S(\omega)$ исходного ряда среднемесячных значений МЭ со спектром m_k компонентов $m(t)$. В стационарном приближении все процессы по определению рассматриваются как стохастические. В этом случае годовой ход в $S(\omega)$ представлен квазилинейчатыми пиками на частоте годовой гармоники ω_0 и ее обертонах ω_k , которые можно аппроксимировать треугольниками. Тогда амплитуда колебаний a_k в полосе частот $\delta\omega$ в окрестности ω_k может быть, согласно работе [4], рассчитана как:

$$a_k = \sqrt{2\delta\omega S(\omega_k)}, \quad (8)$$

а относительные вклады $m(t)$, МС и АС в дисперсию результирующего годового хода определены соотношением между m_k и a_k .

Другим способом сопоставления мощности регулярного $m(t)$ и стохастического (МС) сигналов является сравнение $S(\omega)$ с нулевым спектральным компонентом $s_0(\omega)$ модели ПКСП (стационарное приближение к ПКСП, не содержащее регулярных колебаний):

$$S(\omega) = s_0(\omega) + \sum_k m_k^2 \delta(\omega + 2k/\theta). \quad (9)$$

В этой оценке дополнительным преимуществом является графическое сравнение $s_0(\omega)$ и $S(\omega)$ – сохранение пика на частоте годовой гармоники и/или ее обертонов в спектре $s_0(\omega)$ свидетельствует об амплитудной модуляции МС. Другим признаком возможного проявления амплитудной модуляции в МС является наличие боковых лепестков на частотах, соответствующих периодам 14–16 и 9–10 месяцев. Они часто

не видны в исходных спектрах на фоне годового пика, но становятся заметными (если они есть) в спектре $s_0(\omega)$ после удаления из исходных данных $m(t)$ [5, 11].

Для более подробного описания эволюции МС во времени используется разложение среднемесячных данных в ряд Фурье на годовых отрезках:

$$\zeta(t_j) = a_{0,j} + \sum_{k=1}^m a_{k,j} \cos(\omega_k t_j + \psi_{k,j}). \quad (10)$$

Такое разложение позволяет представить АС рядом $a_0(t_j)$, а МС – рядами $a_k(t_j)$, $\psi_k(t_j)$ и исследовать их теми же методами, что и данные, сгруппированные за одноименные месяцы [7], включая оценки квантилей межгодовой изменчивости, трендов [6] и сопряженности АС с параметрами МС [1].

Специфика анализа скорости ветра

Анализ скорости ветра выполнен на основе векторно-алгебраического метода, предложенного в работе [2]. В качестве модели скорости ветра принят евклидов вектор $\vec{V}(t)$ с модулем V , направлением φ и декартовыми проекциями V_x, V_y . Периодический вектор математического ожидания $\vec{m}_{\vec{V}}(t)$ в компонентной форме представлен согласно работам [3, 11] как:

$$\vec{m}_{\vec{V}}(t) = \vec{m}_0 + \sum_{k=1}^s \vec{m}_k(t), \quad (11)$$

где \vec{m}_0 – вектор средней многолетней скорости ветра, $\vec{m}_k(t)$ – векторные гармоники. Конец периодического вектора $\vec{m}_k(t)$ обходит развернутый на угол $\beta_k \pm 180^\circ$ от направления на север (по часовой стрелке или против часовой стрелки) эллипс с полуосями $L_{1,k}, L_{2,k}$ и фазой $\psi_k \pm \theta_k/2$.

Дисперсионный вклад гармоник $\vec{m}_k(t)$ в результирующий годовой ход (11) представлен числами

$$C_k = \frac{L_{1,k}^2 + L_{2,k}^2}{\sum_k (L_{1,k}^2 + L_{2,k}^2)}. \quad (12)$$

Периодический тензор $\sigma_{\vec{V}}(t) \equiv D_{\vec{V}}^{0,5}(t)$ в каждый момент времени t представлен согласно работе [2] эллипсом с полуосями λ_1, λ_2 , большая ось которого развернута относительно направления на север на угол α . Линейный инвариант $I_1 = \lambda_1 + \lambda_2$ характеризует полную (изменение модуля и направления скорости) дисперсию, а инвариант $\chi = \lambda_2/\lambda_1$ (вытянутость эллипса) описывает анизотропность $\sigma_{\vec{V}}(t)$. В компонентной форме тензорную кривую $D_{\vec{V}}(t)$ можно представить в виде отрезка ряда Фурье [3]:

$$D_{\vec{V}}(t) = \sum_k [D_{k,c} \cos(\omega_k t) + D_{k,s} \sin(\omega_k t)] = \sum_k [D_k \cos(\omega_k t) + \psi_k] \quad (13)$$

Если векторная гармоника годового хода $\vec{m}_{\vec{V}}(t)$ – эллипс, то тензорная гармоника годового хода $D_{\vec{V}}(t)$ – кривая более высокого порядка, для геометрической интерпретации которой требуется упрощение характеристик, например через инварианты $I_{1,k} = \sqrt{I_{1,k,c}^2 + I_{1,k,s}^2}$, $\psi_k = \arctg(I_{1,k,s}/I_{1,k,c})$.

В качестве векторного аналога коэффициента вариации использованы числа

$$\nu_k = \frac{I_{1,k}^{0,5}}{L_{1,k} + L_{2,k}}. \quad (14)$$

Столь сложная кинематическая интерпретация годового хода СКО делает описание МС методом разложения (11) ряда $\vec{V}(t_j)$ на годовых отрезках наиболее продуктивным именно для скорости ветра.

Таким образом, вероятностные характеристики годового хода скорости ветра представляются не графиками одномерных функций времени, как у скалярных величин, а многомерными геометрическими образами. Поэтому для скорости ветра форма графического представления особенно важна. Когерентные оценки $\vec{m}_{\vec{v}}(t)$, $\sigma_{\vec{v}}(t)$ полезно представить совмещением векторов средней скорости и эллипсов рассеяния либо для каждого месяца отдельно, либо в виде годографа годового хода. Годограф $\vec{m}_{\vec{v}}(t)$ целесообразно дополнить годографами компонентов $\vec{m}_k(t)$. Для уточнения формы, характерных размеров и фазы годового хода и межгодовой изменчивости его параметров такое представление сопровождается графиками отдельных характеристик – модуля и направления средней скорости, параметров эллипса и инвариантов тензора $\sigma_{\vec{v}}(t)$.

ДАнные И ИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

В качестве исходных данных для анализа использованы ряды данных четырехсрочных стандартных метеорологических наблюдений за температурой воздуха (T), атмосферным давлением на уровне моря (P), абсолютной влажностью воздуха (A), скоростью ветра (\vec{v}) и баллом общей облачности (N), прошедшие критический контроль и занесенные в электронный архив. Описание приведенных в архиве данных и процедуры их контроля описаны в работе [7]. На основе этих данных были вычислены среднемесячные значения вышеперечисленных МЭ для периода 1936–2007 гг. (864 месяца). При этом были проанализированы только месяцы, для которых имелись данные за все 4 срока наблюдений за 25 и более дней. По этому критерию не были использованы данные за 5 месяцев для T и P , 4 месяца – для N , 3 месяца – для \vec{v} и 22 месяца для A . Поскольку модель ПКСП предполагает исключение АС, центрирование архивных среднемесячных значений на среднегодовые было выполнено на этапе предварительной подготовки данных.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предметом настоящего исследования является годовой ход среднемесячных значений $\zeta(t)$. В табл. 1 вклад этого процесса в общую изменчивость представлен соотношением дисперсий среднемесячных и среднесуточных данных. Как видно из табл. 1, наиболее велико это соотношение для T (более 95 %) и для A (более 80 %), а минимально для N и \vec{v} (порядка 25 %).

Представленные на рис. 1 а в качестве примера графики для десятилетнего периода наблюдений иллюстрируют степень близости рядов T , P , A , N , \vec{v} к «идеальному» годовому ходу (косинусоида с периодом 1 год), а совмещение их с графиками $m(t)$ визуализирует особенности наблюдаемой межгодовой изменчивости МЭ. Как видно из рис. 1 а, наиболее близкий к «идеальному» годовой ход имеют

Таблица 1

Дисперсии среднесуточных (д) и среднемесячных (м) значений T , P , A , N , \vec{v} и составляющих годового хода и межгодовой изменчивости МЭ

Метео элемент	Масштаб осреднения							
	месяц						год	
	D_m	D_m/D_d , %	$D_{m(t)}$	$D_{m(t)}/D_m$	D_{MC}	D_{MC}/D_m	D_{AC}	D_{AC}/D_{MC}
T , °С	219,8	96	210,5	0,96	7,2	0,03	2,0	0,28
P , гПа	39,5	37	19,3	0,49	18,1	0,46	2,2	0,13
A , кг/м ³ ·10 ⁴	539,7	82	522,2	0,97	11,9	0,02	5,5	0,46
N , балл	2,2	22	1,2	0,54	0,8	0,36	0,2	0,25
\vec{v} , м/с	8,2	26	4,6	0,56	3,1	0,37	0,5	0,16

Примечание. Скорость ветра представлена линейным инвариантом тензора дисперсии

T и A . Межгодовая изменчивость у этих МЭ проявляется в основном в форме амплитудной модуляции, у A — только летом, а у T зимой (сильнее) и летом (слабее). Значительно сложнее годовой ход P и N . Межгодовая изменчивость P и N значительно интенсивнее, чем T и A , и не сводится только к АМ. Изменение взаимного расположения на оси t экстремумов $\zeta(t)_j$ и $m(t)$ характеризует также наличие фазовой модуляции, а появление и исчезновение вторичных годовых экстремумов иллюстрирует изменчивость формы годовых циклов. У \vec{V} годовой ход направления характеризуется квазирегулярным разворотом ветра от ССВ к ЮЗ и обратно, межгодовая изменчивость модуля скорости ветра выражена, прежде всего (но не только), в форме АМ.

Оценки спектральной плотности в стационарном приближении во всем диапазоне частот приведены на врезках рис. 1 б. Как видно из рисунков, в спектрах $S(\omega)$ всех процессов практически единственной доминантой является квазилинейчатый пик на частоте годового колебания, на фоне которого у A заметно полугодовое колебание, а у N — колебание с периодом 4 месяца. Для уточнения вида оценок в диапазонах межгодовой и внутригодовой изменчивости на рис. 1 б приведены графики $S(\omega)$ со срезанным годовым пиком. После такой процедуры полугодовая гармоника становится заметной на всех спектрах, за исключением N . Особенно ярко она выражена у A . Можно отметить также гармонику с периодом 4 месяца-

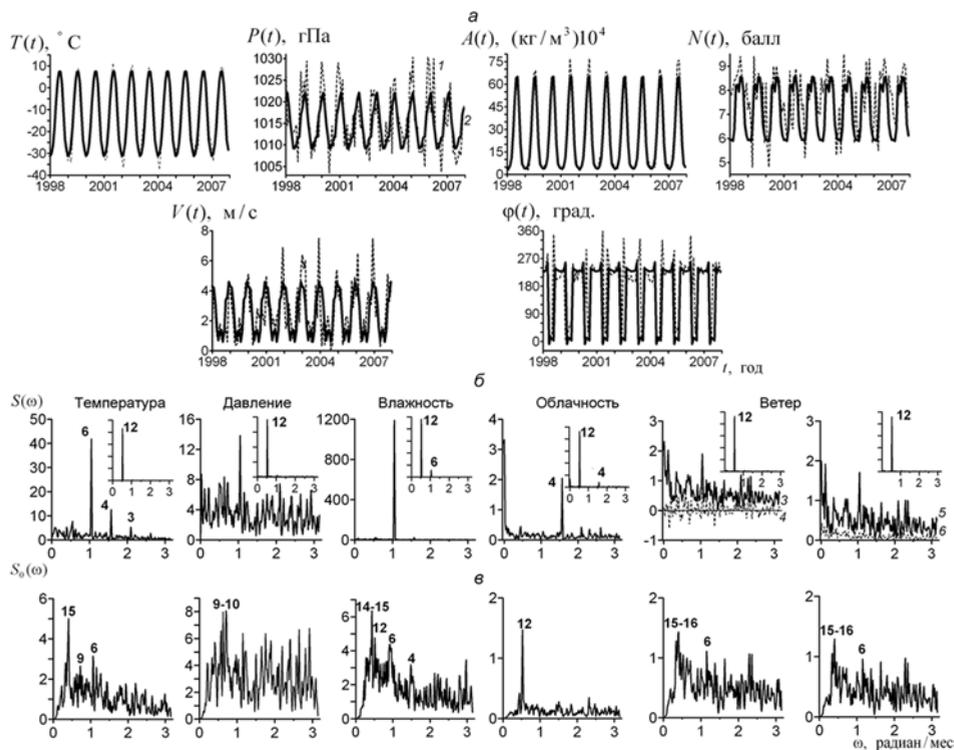


Рис. 1. Временные ряды среднесесячных значений МЭ (а) и оценки их спектральной плотности в стационарном (б) и в ПКСП-приближении (в)

Цифрами на графиках временных рядов (а) обозначены: 1 — среднесесячные данные; 2 — среднегодовой годовой ход; 3, 4, 6 — инварианты тензора спектральной плотности линейный $I_1(\omega)$, индикатор вращения $\vartheta(\omega)$ и собственные значения $\lambda_{1,2}(\omega)$ соответственно. Спектры (б): «срезанный» годовой ход, на врезках — полные спектры, цифры на спектрах — периоды колебаний МЭ в месяцах

ца у T и N и гармонику с периодом 3 месяца – у T . Межгодовые и внутригодовые колебания практически отсутствуют у A и незначительны у T . Межгодовая изменчивость проявляется в виде красного шума у P , более выражена у \vec{V} и наиболее заметна у N . Внутригодовая изменчивость в виде белого шума особенно заметна у P и \vec{V} . Тензор спектральной плотности скорости ветра $S_{\vec{v}}(\omega)$ помимо общей оценки $I_1(\omega)$ представлен инвариантами $\lambda_{1,2}(\omega)$ и индикатором вращения $\vartheta(\omega)$ (преобладание вращения по часовой стрелке $\vartheta > 0$ и $\vartheta < 0$ против часовой стрелки). На частоте годового колебания $\vartheta(\omega) > 0$, а на остальных частотах $\vartheta(\omega) \ll I_1(\omega)$, то есть преобладающего направления вращения нет. Во всей частотной области $\lambda_1 > \lambda_2$, то есть распределение дисперсии по направлениям анизотропное.

Количественная оценка $S(\omega)$ в терминах спектральной функции (1) приведена в табл. 2 и отчасти воспроизводит результаты работы [7]. Годовой ход объясняет более 85 % дисперсии среднемесячных значений T , A и около 50 % дисперсии P , N и \vec{V} . Основную часть этой дисперсии обеспечивает годовое колебание, проявления 1/2-годового и 1/3-годового обертонов заметны у A и N . Вклад в дисперсию колебаний с периодами более 2 лет заметен для P , N и \vec{V} – 6–11 %. Вклад в дисперсию нерегулярных внутригодовых флуктуаций определяется дополнением до 100 % суммы из первой и второй колонок табл. 1 и составляет около 10 % для T , A и около 40 % для P , N и \vec{V} .

Стационарное приближение не дает полной характеристики годового хода МЭ, поскольку в нем сочетаются регулярная повторяемость и стохастическая изменчивость. За основу дальнейшего анализа была принята модель ПКСП, постулирующая неизменность когерентных оценок вероятностных характеристик при сдвиге на период коррелированности. Когерентные оценки (2) годового хода математического ожидания $m(t)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma(t)$ приведены на рис. 2 а. Оценки $\sigma(t)$ вычислены по данным, центрированным на среднегодовые значения. Скорость ветра представлена графиками годового хода модуля и направления $m_{\vec{v}}$, $\varphi(t)$ периодического вектора $\vec{m}_{\vec{v}}(t)$ и инвариантов I_1 , $\lambda_{1,2}$, $\alpha(t)$ периодического тензора $\sigma_{\vec{v}}(t)$. На рис. 2 б она представлена годографом среднемесячных значений $\vec{m}_{\vec{v}}(t) - \vec{m}_{\vec{v}}$ и эллипсами $\sigma_{\vec{v}}(t)$ для центральных месяцев календарных сезонов. Эти оценки дополняют приведенные в работе [7] графики годового хода квантилей распределения P и T , повторяемости ясного, полужасного и пасмурного неба и роз ветра по месяцам.

Из рис. 2 а видно, что форму, наиболее близкую к косинусоиду с периодом 1 год, имеют кривые $m(t)$ для T и A , а также кривые $\sigma(t)$ для A . При этом для A характерно замедленное увеличение обеих характеристик от зимы к лету и ускоренное уменьшение от лета к зиме. Годовой ход $m(t)$ и $\sigma(t)$ для P и N также близок к косинусоиду с годовым периодом, но эти графики осложнены рядом деталей, что особенно заметно в годовом ходе $\sigma(t)$ у P и N . Интересно отметить, что максимумы $m(t)$

Таблица 2

Распределение дисперсии среднемесячных значений T , P , A , N , \vec{V} по частотным диапазонам (%)

Метео-элемент	Диапазон колебаний, период θ (лет)					
	межгодовые, $\theta > 2$	годовой ход с обертонами				
		все гармоники	$\theta = 1$	$\theta = 1/2$	$\theta = 1/3$	$\theta = 1/4$
T , °С	0,8	86	84	1	0,2	0,1
P , гПа	6	48	43	2	0,4	1
A , кг/м ³ ·10 ⁴	0,5	88	77	11	0,2	<0,1
\vec{V} , м/с	11	53	47	1	4,2	1
N , балл	7	53	49	2	0,4	1

Примечание. Вектор скорости ветра представлен линейным инвариантом тензора спектральной плотности.

и $\sigma(t)$ для всех элементов приходится либо на зиму ($m(t)$ для P , $\sigma(t)$ для T, P, N), либо на лето ($m(t)$ для T, A, N , $\sigma(t)$ для A), но никогда – на переходные сезоны. Кривые $m(t)$ и $\sigma(t)$ синфазны для P, A и противофазны для T и N .

Годовой ход скорости ветра характеризуется разворотом весной и осенью от ЮЗ (зима) к СВ (лето) и обратно. Годограф на рис. 2 б показывает, что разворот происходит почти реверсивно при усилении ветра указанных направлений в теплый и холодный сезоны. В холодный сезон усилена общая изменчивость скорости ветра и вытянутость эллипса $\sigma_{\vec{v}}(t)$, ориентация которого $\alpha(t)$ во все месяцы согласована с направлением результирующего ветра $\varphi(t)$. Указанный разворот ветра обусловлен сменной типов барических полей, характерных для района Тикси в теплый и холодный сезоны. Сопоставление годового хода скорости ветра, показанного на рис. 2 (центрирование на среднегодовые значения), с розами ветра по месяцам, приведенными в работе [7] (исходные данные), подчеркивает, что операция центрирования позволяет уточнить хронологические границы естественных сезонов.

Результаты дисперсионного анализа по модели (формула 3), приведенные в табл. 1, показывают, что дисперсия регулярных колебаний $m(t)$ объясняет более 95 % дисперсии годового хода среднемесячных значений T и A , в то время как для P, N и

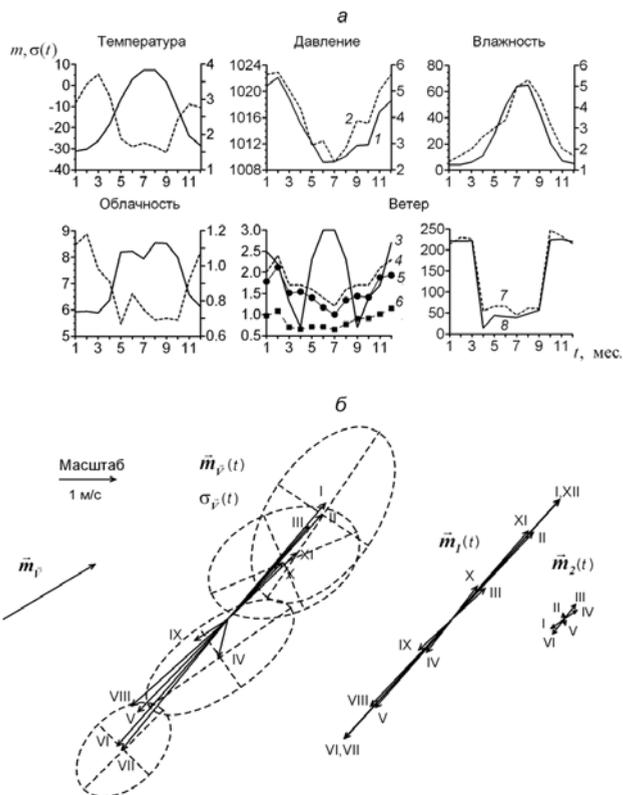


Рис. 2. Когерентные оценки годового хода $m(t)$ и $\sigma(t)$ основных скалярных метеорологических элементов (а), когерентные и компонентные оценки годового хода скорости ветра (б): средняя многолетняя \vec{m}_v , годового хода $\vec{m}_v(t)$, эллипс $\sigma_{\vec{v}}(t)$ для центральных месяцев календарных сезонов, годовая $\vec{m}_1(t)$ и полугодовая гармоники $\vec{m}_2(t)$.

Цифры на графиках: 1 – $m(t)$, 2 – $\sigma(t)$, 3 – $m_v(t)$, 4, 5, 6 – $I_1, \lambda_{1,2}(t)$, 7, 8 – $\alpha(t)$, $\varphi(t)$, римские цифры – номер месяца

\vec{V} дисперсионные вклады $m(t)$ и стохастической составляющей МС примерно одинаковы. При этом, как следует из последнего столбца таблицы 1, МС (изменчивость параметров годовых циклов) при годовом масштабе осреднения вносит в дисперсию вклад многократно больший, чем АС (изменчивость среднегодовых значений). Отношение дисперсий МС и АС составляет 4–7 для T, P, N, \vec{V} и только для A уменьшается до 2.

Завершая обсуждение когерентных оценок, подчеркнем, что годовой ход проявляется не только в среднем $m(t)$, но и в характеристиках изменчивости $\sigma(t)$. Отличие T, A от P, N, \vec{V} проявляется не только в соотношении $m(t)$ и МС, но и в характере МС. Для T, A характерна прежде всего амплитудная модуляция годового хода, а для P, N, \vec{V} важны также фазовая модуляция и изменчивость формы кривых годового хода.

Для количественного описания и сравнения качественно различающихся кривых $m(t)$ и $\sigma(t)$ были использованы компонентные оценки скалярных (формулы 4–8) и векторных (формулы 11–14) величин метеорологических элементов. В табл. 3 а

Таблица 3 а

Оценки параметров m_k, σ_k и Ψ_k, B_k, a_k и v_k годового хода температуры воздуха (T), атмосферного давления (P), влажности воздуха (A) и балла общей облачности (N)

Метео-элемент	k	a_k	Компоненты $m(t)$					Компоненты $\sigma(t)$				v_k
			m_k	m_k/a_k	Ψ_k		$B_k, \%$	σ_k	Ψ_k		$B_k, \%$	
					град.	мес.*			град.	мес.*		
$T, ^\circ\text{C}$	0	—	—	—	—	—	—	2,5	—	—	—	—
	1	21,2	20,4	0,96	189	7,3	99	0,9	21	1,7	83	0,04
	2	2,1	1,9	0,90	39	1,7	0,7	0,2	137	3,3	5	0,11
	3	1,2	1,1	0,92	11	1,1	0,3	0,4	180	3,0	11	0,36
	4	0,7	0,5	0,77	24	2,2	<0,1	0,1	21	1,2	2	0,20
$P, \text{гПа}$	0	—	—	—	—	—	—	4,2	—	—	—	—
	1	6,3	6,1	0,97	11	1,4	96	1,6	360	1,0	97	0,26
	2	1,2	1,0	0,83	59	2,0	3	0,1	88	2,5	0,5	0,10
	3	—	0,1	—	243	3,7	< 0,1	< 0,1	297	4,3	< 0,1	0,34
	4	—	0,6	—	139	2,2	1	0,2	223	2,9	2,5	0,33
$A, \text{кг/м}^3 \cdot 10^4$	0	—	—	—	—	—	—	3,0	—	—	—	—
	1	31,7	30	0,95	190	7,3	90	1,7	195	7,5	91	0,06
	2	11,2	10	0,89	26	1,4	9,8	0,5	71	2,2	8	0,05
	3	—	1	—	253	3,8	0,1	0,2	266	4,0	1,7	0,20
	4	—	1	—	192	2,6	0,1	0,1	49	1,4	0,3	0,10
$N, \text{балл}$	0	—	—	—	—	—	—	0,9	—	—	—	—
	1	1,7	1,5	0,88	198	7,6	91	0,22	16	1,5	84	0,15
	2	—	0,1	—	195	4,3	0,5	0,09	4	1,1	14	0,90
	3	0,48	0,4	0,87	26	1,3	7,5	0,03	169	2,9	1,5	0,03
	4	—	0,2	—	152	2,3	1	0,02	244	3,0	0,5	0,10

* Здесь и далее фаза отсчитывается от января (1) до декабря (12 или –1)

Таблица 3 б

Оценки параметров годового хода скорости ветра

k	a_k	Компоненты $\vec{m}_v(t)$							Компоненты $\sigma_{\vec{v}}(t)$				v_k	
		$L_{1,k}$	$L_{2,k}$	χ_k	Λ_k/a_k	β_k	Ψ_k		$C_k, \%$	$\Pi, \text{к}$	Ψ_k			$C_k, \%$
							град.	мес.			град.	мес.		
0	—	средняя скорость 2,0 м/с 239°							2,4	—	—	—	—	
1	3,1	3,0	0,1	0,02	0,97	222	166	6,5	97	1,0	12	1,4	87	0,33
2	0,4	0,4	0,1	0,26	0,96	224	321	6,4	1,8	0,05	25	1,4	1	0,12
3	0,2	0,2	0,1	0,39	0,85	243	308	4,4	0,6	0,1	9	1,1	1	0,47
4	0,3	0,2	0,1	0,53	0,81	248	132	2,1	0,6	0,4	38	1,3	12	1,38

для T , P , A и N приведены оценки амплитуд m_k , σ_k и фаз ψ_k годового хода $m(t)$ и $\sigma(t)$. Компонент σ_0 определяет среднее за год значение среднего квадратического отклонения. Числа B_k (формула 6) характеризуют вклад k -ой гармоники в результирующий годовой ход. Отношение оценки a_k амплитуды по спектру стационарного приближения (формула 8) с m_k показывает вклад регулярной составляющей $m(t)$ в многолетний годовой ход, т.е. соотношение МС и $m(t)$. Другой характеристикой этого соотношения является v_k — спектральный коэффициент вариации (формула 7).

Приведенные в табл. 3 а значения коэффициентов разложения a_k показывают явное преобладание годовой гармоники в $m(t)$ и $\sigma(t)$. Величины B_k определяют как наиболее близкую к косинусоиде кривую $m_1(t)$ ($B_1 = 99\%$). Для $m_A(t)$ такой же (99%) вклад обеспечивают годовая и полугодовая гармоники. При этом относительно большое значение $B_2 = 10\%$ иллюстрирует асимметрию годового хода влажности, отмеченную на рис. 2 а. Для облачности вклад годовой гармоники B_1 в $m_N(t)$ составляет 91%. Существенен также вклад гармоники с периодом 4 месяца.

Как следует из табл. 3 а, спектры B_k кривых $m(t)$ и $\sigma(t)$ для A и P практически идентичны, в то время как для T и N значения первой гармоники $B_1^{(\sigma)}$ уменьшаются по сравнению с $B_1^{(m)}$ до 85%. Фаза ψ_1 годовой гармоники приходится на основные сезоны: зимний — для $m_P(t)$, $\sigma_{T,P,N}(t)$ и летний — для $m_{T,A,N}(t)$, $\sigma_A(t)$. Интенсификация изменчивости в зимний сезон характерна для большинства МЭ в высоких и умеренных широтах. Одной из возможных причин этого может быть усиление влияния вариаций адвективных процессов в атмосфере и уходящей длинноволновой радиации на фоне ослабленной (в полярную ночь нулевой) приходящей солнечной радиации. Для влажности усиление $\sigma(t)$ летом и уменьшение зимой очевидным образом связаны с низкими значениями A в холодный сезон.

Отношение $(m/a)_k$ (0,95 и более для T , P , A и 0,88 для N) демонстрирует определяющую роль $m(t)$ в колебаниях на частоте годовой гармоники. Коэффициент вариации v_k для всех k меньше 1. Он иллюстрирует очень сильную устойчивость годового колебания температуры и влажности воздуха и несколько ослабленную устойчивость — давления и общей облачности. Отметим увеличение v_k до 0,9 для полугодовой гармоники N .

В табл. 3 б средний многолетний годовой ход $\vec{m}_V(t)$ скорости ветра представлен длинами полуосей $L_{1,2,k}$, ориентацией β_k и фазой ψ_k эллипсов $\vec{m}_k(t)$ разложения (11). Величину вклада $\vec{m}_k(t)$ в $\vec{m}_V(t)$ характеризуют числа C_k (формула 12). Соотношение $\vec{m}_V(t)$ и МС характеризуется отношением чисел $\Lambda_k = L_{1,k} + L_{2,k}$ к амплитудам a_k по спектру стационарного приближения (формула 8) и векторным коэффициентом вариации v_k (формула 14). Годовой ход СКО представлен компонентами инварианта $I_k(t)$ аналогично табл. 3 а.

Табл. 3 б показывает, что годовая ($C_k = 97\%$) и полугодовая ($C_k = 2\%$) гармоники практически полностью описывают $\vec{m}_V(t)$. Эллипсы $\vec{m}_1(t)$ и $\vec{m}_2(t)$ сильно вытянуты, ориентированы вдоль годографа $\vec{m}_V(t)$ (рис. 2 б) и синфазны, фазы $\vec{m}_{1,2}(t)$ приходятся на январь и июнь. В годовом ходе $I_1(t)$ первая гармоника описывает 87% изменчивости. Можно отметить также повышенный вклад 1/4-годовой гармоники. Фаза ψ_1 приходится на январь. Годовое колебание ветра устойчиво, однако не столь сильно, как для других МЭ ($v_k = 0,33$). Следует отметить неустойчивость 1/4-годового колебания.

Графики нулевого спектрального компонента (формула 9) приведены на рис. 1 в. Как видно из рисунка, в спектре $s_0(\omega)$ для облачности четко выделяется пик на частоте годового колебания, что указывает на амплитудную модуляцию этого МЭ в диапазоне межгодовой изменчивости. В спектрах других МЭ присутствует сильный белый шум, свидетельствующий о наличии нерегулярных флуктуаций в $\zeta(t)_j$. Особенности

на периодах 14–15 и 9–10 месяцев можно трактовать как боковые полосы спектра годового колебания, что также является проявлением АМ [11]. Особенности спектров на периодах 6 и 4 месяца демонстрируют изменчивость формы годового хода.

Проведенный анализ показывает, что для описания наиболее общих особенностей годового хода $m(t)$ и МС достаточно учитывать годовую и полугодовую гармоники, а для уточнения дополнительно 1/3-годовую гармонику N и 1/4-годовую гармонику \vec{V} .

Межгодовая изменчивость параметров $a_k(t)$, $\psi_k(t)$ разложения (формула 10) рядов $\zeta(t)$, на годовых отрезках представлена квантилями межгодовой изменчивости. При этом, поскольку компонентами годового хода скорости ветра (формула 11) являются эллипсы, для \vec{V} приведены квантили длин полуосей и ориентации векторных гармоник $\vec{m}_k(t)$. Предварительно для выделения наиболее значимых компонентов в табл. 4 эти же оценки получены для вкладов B_k отдельных гармоник (формула 6) в результирующий годовой ход. Квантили X_p порядка p как величины, обратные функции распределения вероятностей, определяют аномалии обеспеченностью $p \times 100\%$ и $(1 - p) \times 100\%$. Таким образом, интервалы от $X_{0,75}$ до $X_{0,25}$ (Q) и от $X_{0,95}$ до $X_{0,05}$ (R) включают 50% и 90% значений в окрестностях центра распределения $X_{0,5}$ [7]. Хотя компоненты годового хода различных МЭ име-

Таблица 4

Квантили X_p , интерквантильное расстояние Q и размах R межгодовой изменчивости вклада компонентов Фурье в результирующий годовой ход метеорологических элементов

Метео-элемент	k	Порядок p квантили X_p									$Q = X_{0,75} - X_{0,25}$	$R = X_{0,95} - X_{0,05}$
		X_{\min}	$X_{0,05}$	$X_{0,10}$	$X_{0,25}$	$X_{0,50}$	$X_{0,75}$	$X_{0,90}$	$X_{0,95}$	X_{\max}		
Вклад индивидуальных компонентов B_k в аппроксимацию (10) при $m=4$												
$T, ^\circ\text{C}$	1	92,3	93,9	95,2	96,3	97,4	98,4	99,0	99,2	99,6	2,1	7,3
	2	0,0	0,1	0,2	0,5	1,2	2,3	3,6	4,3	5,9	1,8	5,9
	3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	1,1	1,5	1,8	2,7	0,9	2,7
	4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0,7	1,1	1,4	2,7	0,6	2,7
$P, \text{гПа}$	1	14,5	25,4	31,6	54,0	68,5	81,0	86,6	88,5	98,9	27,0	84,4
	2	0,7	1,4	1,	4,5	8,5	18,9	26,8	33,8	40,6	14,4	39,9
	3	0,3	1,3	1,9	3,8	8,0	13,8	28,4	33,7	39,7	10,0	39,4
	4	0,1	0,6	0,7	3,1	8,1	16,4	28,4	37,2	60,6	13,3	60,5
$A, \text{кг/м}^3 \cdot 10^4$	1	83,7	85,3	85,6	87,0	88,5	90,6	92,1	93,0	93,7	3,6	10,0
	2	5,6	6,7	7,3	8,8	10,9	12,3	13,8	13,9	15,2	3,5	9,6
	3	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,6	1,0	1,2	1,8	0,5	1,8
	4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,8	1,0	1,4	0,3	1,4
$N, \text{балл}$	1	12,1	35,5	43,2	58,8	73,0	82,6	91,6	93,1	94,1	23,8	82,0
	2	0,1	0,4	0,8	2,6	5,2	12,6	20,7	26,6	49,4	10,0	49,3
	3	0,4	0,7	1,4	3,0	9,5	18,9	26,8	49,9	59,0	15,9	58,6
	4	0,0	0,2	0,6	1,7	4,9	13,2	18,5	22,7	46,7	11,5	46,7
$\vec{V}, \text{м/с}^*$	1	39,7	56,4	57,6	66,2	76,0	82,6	89,5	91,7	94,7	16,4	55,0
	2	0,7	2,2	3,7	5,2	8,6	13,2	18,9	22,0	27,3	8,0	26,6
	3	0,5	0,9	1,2	2,2	6,5	10,7	16,0	18,3	28,1	8,5	27,6
	4	0,4	1,9	2,1	3,6	6,1	10,7	15,9	23,1	38,0	7,1	37,6
Суммарный вклад k первых компонентов в аппроксимацию (10) при $m=4$												
$T, ^\circ\text{C}$	0–2	96,4	97,0	97,7	98,4	98,9	99,3	99,7	99,8	99,9	0,9	3,5
$P, \text{гПа}$	0–2	26,7	41,7	47,5	70,2	82,7	90,1	93,6	95,1	99,7	19,9	73,0
	0–3	39,4	62,6	71,7	83,6	92,3	97,2	99,3	99,4	99,9	13,6	60,5
$A, \text{кг/м}^3 \cdot 10^4$	0–2	97,2	98,0	98,6	98,9	99,4	99,7	99,8	99,9	99,9	0,8	2,7
$N, \text{балл}$	0–2	30,6	45,5	60,4	69,4	81,4	91,6	94,0	96,2	97,5	22,6	66,9
	0–3	53,2	77,5	81,6	87,0	95,4	98,3	99,4	99,9	100	11,3	46,8
$\vec{V}, \text{м/с}^*$	0–2	51,2	67,9	71,2	79,4	85,7	91,2	94,8	95,8	97,1	11,8	45,9
	0–3	62,2	77,2	84,0	89,3	93,8	96,4	97,9	98,1	99,4	7,1	37,2

* Для \vec{V} использован линейный инвариант тензора дисперсии

ют разную размерность и масштаб (амплитуды $a_1 \gg a_{k>1}$), сравнение ширины интервалов Q и R с медианой $X_{0,5}$ позволяет сопоставимо оценить интенсивность их межгодовой изменчивости. В табл. 4 приведены квантильные оценки межгодовой изменчивости дисперсионных вкладов B_k для индивидуальных компонентов и совокупного вклада k первых компонентов.

Анализ данных, приведенных в табл. 4, подтверждает выявленное ранее различие временной изменчивости T, A , с одной стороны, и P, N, \vec{V} – с другой стороны. У температуры и влажности воздуха первая гармоника объясняет не менее 90 % (T) и 80 % (A) дисперсии регулярного годового хода. Различие между характеристиками изменчивости указанных параметров состоит в повышенном вкладе полугодовой гармоники для A . Суммарный вклад B_{1+2} годовой и полугодовой гармоник T и A всегда превышает 95 % общей дисперсии.

Для остальных элементов 80 %-й вклад первой гармоники реализуется только в 25 % случаев (из 72 с 1936 по 2007 г.), а 80 %-й совокупный вклад первых двух гармоник B_{1+2} – в 50 % случаев. Отметим также, что многолетний минимум B_{1+2} составляет около 30 % для P, N и около 50 % для \vec{V} . Вклады высших компонентов $B_{3,4}$

Таблица 5 а

Квантили X_p межгодовой изменчивости среднегодовых значений a_0 , амплитуд a_k и фаз ψ_k (месяц) компонентов Фурье годового хода T, P, A и N , интерквантильное расстояние Q и размах R в абсолютных единицах и в долях амплитуды m_k компонентов математического ожидания

Метеоэлемент	Параметр	Порядок p квантили X_p								$Q = X_{0,75} - X_{0,25}$		$R = X_{\max} - X_{\min}$		
		X_{\min}	$X_{0,05}$	$X_{0,10}$	$X_{0,25}$	$X_{0,50}$	$X_{0,75}$	$X_{0,90}$	$X_{0,95}$	X_{\max}	Q	$Q/X_{0,5}$	R	$R/X_{0,5}$
$T, ^\circ\text{C}$	a_0	-16,6	-15,1	-15,0	-14,0	-13,0	-12,1	-11,3	-10,9	-10,6	1,9	—	6,0	—
	a_1	17,2	18,5	19,1	19,4	20,3	21,5	22,1	22,6	23,3	2,1	0,10	6,1	0,30
	a_2	0,2	0,6	1,0	1,5	2,4	3,2	3,7	4,3	4,4	1,7	0,71	4,3	1,79
	j_1	6,9	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,5	7,5	0,2	—	0,6	—
	j_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$P, \text{гПа}$	a_0	1011,5	1012,3	1012,6	1013,5	1014,8	1015,9	1016,8	1017,0	1018,1	2,4	—	6,6	—
	a_1	1,0	2,7	3,0	5,1	6,5	8,3	9,4	10,1	11,3	3,2	0,49	10,3	1,58
	a_2	0,7	0,8	1,0	1,5	2,3	3,1	4,1	4,4	5,9	1,6	0,70	5,2	2,2
	a_3	0,5	1,1	1,1	1,5	2,1	2,8	3,7	4,0	5,6	1,3	0,62	5,1	2,43
	a_4	0,2	0,5	0,6	1,3	2,0	2,9	4,4	5,0	5,6	1,6	0,80	5,4	2,70
j_1	-0,8	0,3	0,5	0,9	1,3	1,7	2,1	2,3	2,6	0,8	—	3,4	—	
$A, \text{кг/м}^3 \cdot 10^4$	a_0	22	23	23	24	26	27	28	28	31	3	—	9	—
	a_1	26	27	27	29	31	32	33	34	36	3	0,09	10	0,32
	a_2	7	8	8	9	11	12	13	13	14	3	0,27	7	0,64
	j_1	7,1	7,2	7,2	7,2	7,3	7,4	7,4	7,5	7,6	1,2	—	0,5	—
	j_2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,8	0,1	—	0,7	—
$N, \text{балл}$	a_0	6,2	6,5	6,5	6,8	7,2	7,5	7,8	8,0	8,3	0,7	—	2,2	—
	a_1	0,3	0,7	0,8	1,1	1,5	1,8	2,3	2,5	2,8	0,7	0,50	2,5	1,67
	a_2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,9	1,0	1,2	0,2	0,50	1,1	2,75
	a_3	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	0,7	1,1	1,1	1,4	0,4	0,80	1,3	2,60
	a_4	0,0	0,1	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	1,1	0,3	0,75	1,0	2,50
j_1	6,1	6,6	6,9	7,2	7,7	8,0	8,5	8,6	9,6	0,8	—	3,5	—	

для P, N, \vec{V} в отдельные годы могут достигать от 40 до 60 %, что формирует годовой ход очень сложной формы. Таким образом, для T, A можно ограничиться годовой и полугодовой гармониками, а для P, N, \vec{V} необходимо учитывать все компоненты.

Квантили межгодовой изменчивости амплитуд и фаз компонентов разложения (10) рядов $\zeta(t)_j$ на годовых отрезках приведены в табл. 5 а для T, P, A, N и в табл. 5 б – для \vec{V} .

Табл. 5 а показывает, что фаза годовой гармоники всех элементов и полугодовой гармоники A стабильна. Значения ψ_1 для T и $\psi_{1,2}$ для A можно считать квазипостоянными, так как размах R не превышает 0,5 месяца. Фаза ψ_1 у P и N изменяется несколько больше – в 90 % случаев в пределах 1,5 месяца, а полный размах около 3,5 месяцев. Фазы высших компонентов разложения (формула 10) проходят за исследованные 72 года все возможные значения.

Значительно сильнее изменяются амплитуды. Как и для фаз, наиболее стабильными являются амплитуды первой гармоники (a_1) всех элементов, особенно для T и A . Для остальных МЭ изменчивость a_k (особенно при $k > 1$) значительно выше. Если для годовых гармоник температуры и влажности отношение Q, R к $X_{0,5}$ составляет соответственно 0,1 и 0,3, то у давления и облачности – 0,5 и 1,5. Для $a_{k>1}$ (кроме a_2 влажности) эти отношения превышают 0,5 и 2 соответственно.

Для годовой гармоники \vec{V} (табл. 5 б) форма, фаза и ориентация эллипса $\vec{m}_1(t)$ относительно стабильны, в то время как у $\vec{m}_{k>1}(t)$ они проходят за исследованный период все возможные значения. Характерные величины $\vec{m}_k(t)$ имеют существенные межгодовые вариации даже при $k = 1$, причем изменчивость малой оси $L_{2,k}$ значительнее, чем большой оси $L_{1,k}$, так что форма эллипсов χ_k для $\vec{m}_{k>1}(t)$ изменяется от сильно вытянутой до почти круговой. Эти изменения $L_{1,2,k}$ столь существенны, что в отдельные годы размеры эллипсов $\vec{m}_1(t)$ и $\vec{m}_{k>1}(t)$ могут оказаться сопоставимыми.

Таким образом, подтверждается положение о ведущей роли амплитудной модуляции в МС. Межгодовые вариации формы годового хода и непостоянство распре-

Таблица 5 б

Квантили X_p межгодовой изменчивости модуля и направления среднегодовых значений скорости ветра и параметров компонентов годового хода, интерквартильное расстояние Q и размах R в абсолютных единицах и в долях амплитуды компонентов математического ожидания

Параметр	k	Порядок p квантили X_p									$Q = X_{0,75} - X_{0,25}$		$R = X_{\max} - X_{\min}$	
		X_{\min}	$X_{0,05}$	$X_{0,10}$	$X_{0,25}$	$X_{0,50}$	$X_{0,75}$	$X_{0,90}$	$X_{0,95}$	X_{\max}	Q	$Q/X_{0,5}$	R	$R/X_{0,5}$
Модуль	0	0,8	1,2	1,3	1,6	1,9	2,4	2,8	3,1	3,5	0,8	—	2,7	—
Направление		211	218	219	232	240	248	259	262	311	16	—	100	—
$L_{1,k}$	1	1,8	2,1	2,3	2,6	3,1	3,6	4,0	4,5	5,8	1,0	0,33	4,0	1,29
$L_{2,k}$		0,02	0,03	0,03	0,2	0,3	0,3	0,5	0,6	0,8	0,2	0,67	0,8	2,67
χ_k		<0,01	0,01	0,01	0,05	0,08	0,1	0,2	0,2	0,2	0,07	—	0,3	—
b_k		17	25	26	34	42	49	60	63	64	15	—	47	—
j_k		5,4	5,8	5,8	6,1	6,5	6,8	7,1	7,4	7,9	0,7	—	2,5	—
$L_{1,k}$	2	0,3	0,5	0,6	0,7	1,0	1,2	1,7	1,9	2,1	0,5	0,50	1,7	1,70
$L_{2,k}$		0,02	0,03	0,04	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,2	1,00	0,7	3,50
$L_{1,k}$	3	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,2	1,5	1,6	2,0	0,6	0,75	1,8	2,00
$L_{2,k}$		<0,01	0,02	0,02	0,07	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	0,2	1,00	0,9	4,50
$L_{1,k}$	4	0,2	0,4	0,5	0,6	0,9	1,1	1,5	1,6	2,2	0,5	0,56	1,9	2,11
$L_{2,k}$		0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,6	0,6	0,8	0,2	1,00	0,8	4,00

деления экстремумов по месяцам [7], мало заметные у T , A и значительные у других элементов, связаны с изменчивостью спектрального состава годового хода (табл. 4).

Анализ рядов параметров $a_k(t)$, $\psi_k(t)$ разложения (формула 10) рядов $z(t)$, на годовых отрезках не выявил, как и в рядах среднемесячных данных, проанализированных в работе [7], заметных трендов для всех МЭ, кроме N . На рис. 3 а для N приведены графики рядов среднегодовых значений, амплитуды и фазы годовой гармоники, а также дисперсионного вклада годовой гармоники и ее обертонов в результирующий годовой ход. Облачность в среднем за год имеет тенденцию к увеличению, при этом происходит ослабление годового хода. Для фазы следует отметить увеличение дисперсии после 1975 г. В течение 1936–2007 гг. усложняется форма годового хода – происходит уменьшение вклада годовой гармоники в результирующий годовой ход, которое компенсируется увеличением вклада его 1/3- и 1/4-годовых обертонов.

В работе [1] для пространственно осредненной в высоких и умеренных широтах температуры приземного слоя воздуха была обнаружена отрицательная корреляция среднегодовых значений и амплитуды годовой гармоники. Было высказано предположение, что этот феномен объясняется годовым ходом дисперсии. Действительно, пусть имеем в январе отрицательную аномалию T . Тогда a_0 уменьшается, a_1 возрастает и корреляция $r_{a_0 a_1} < 0$. По аналогичному рассуждению летние аномалии приводят к $r_{a_0 a_1} > 0$. Если бы годового хода дисперсии не было, то в целом за год $r_{a_0 a_1} \cong 0$, но поскольку $D(t)$ зимой больше, чем летом, то $r_{a_0 a_1} < 0$, хотя и $|r_{a_0 a_1}| < 1$. Тогда допустимы следующие предположения о знаке, величине и способе расчета $r_{a_0 a_1}$.

1. Причиной $r_{a_0 a_1} \neq 0$ является годовой ход $\sigma(t)$. Если кривые $m(t)$ и $\sigma(t)$ синфазны, то $r_{a_0 a_1} > 0$ и наоборот. Согласно рис. 2 а для T и N следует ожидать $r_{a_0 a_1} < 0$, а для P и A – $r_{a_0 a_1} > 0$.

2. Модуль $|r_{a_0 a_1}|$ увеличивается с ростом размаха $\sigma(t)$ и при прочих равных условиях больше у тех МЭ, для которых форма кривых $m(t)$ и $\sigma(t)$ близка к косинусоиду с годовым периодом. Наиболее сильную корреляцию следует ожидать для A и для T .

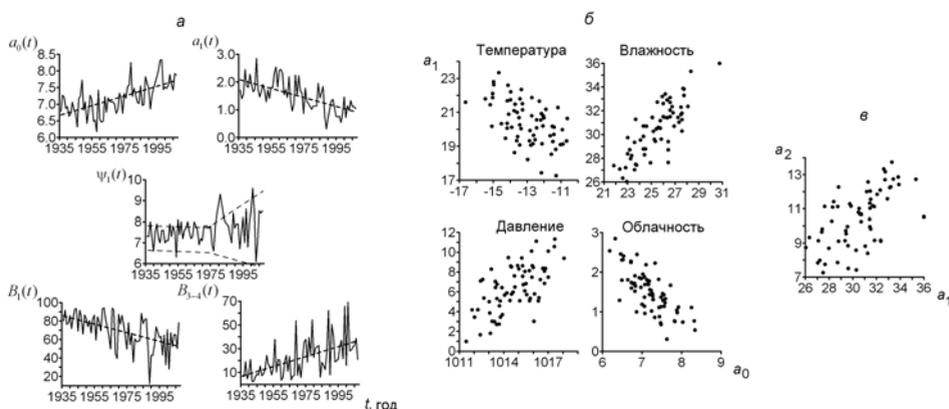


Рис. 3. Характеристики временной изменчивости облачности (а) и сопряженность (б, в) оценок ежегодных компонентов годового хода основных метеорологических элементов

a – по оси ординат, a_0 – среднегодовые значения, a_1 , ψ_1 – амплитуда и фаза годовой гармоники, B_1 , B_{3-4} – дисперсионный вклад годовой гармоники и суммарный дисперсионный вклад 3-й и 4-й гармоник; б – сопряженность среднегодовых значений и амплитуд годовой гармоники МЭ; в – сопряженность амплитуд годовой и полугодовой гармоник влажности воздуха

Корреляция среднегодовых значений и амплитуды годовой гармоник

Годовой цикл	Метеоэлемент			
	T	P	A	N
Январь—декабрь	-0,53	+0,62	+0,80	-0,74 (-0,56)*
Август—июль	-0,73	+0,65	+0,62	-0,70

* Для облачности оценки получены по исходным данным и по аномалиям относительно тренда (в скобках)

3. Оценки a_0 и a_1 получены по годовым циклам, начинающимся в январе, т.е. искусственный разрыв непрерывного процесса помещен в максимум дисперсии T и в минимум дисперсии A . Можно ожидать, что оценки по году с 1 июля дадут увеличение $|r_{a_0 a_1}|$ для T и уменьшение для A .

Графики зависимости на рис. 3 б и оценки $r_{a_0 a_1}$ в табл. 6 полностью подтверждают сделанные предположения и в этом смысле не нуждаются в дополнительном комментарии. Отметим лишь, что сильная (около 0,75) корреляция для облачности в значительной степени обусловлена трендом. Корреляция для скорости ветра $r_{\uparrow\downarrow}$ (в табл. 6 не приводится) определена для взаимно коллинеарных составляющих вектора $\vec{m}_0(t)$ и большой оси эллипса $\vec{m}_1(t)$; $r_{\uparrow\downarrow} = 0,65$.

Корреляция между компонентами годовой гармоник ($k = 1$) и высших гармоник ($k > 1$), а также между компонентами различных МЭ (T, P и др.) не обнаружена. Единственное исключение – положительная (около 0,6) корреляция амплитуд годовой и полугодовой гармоник влажности – рис. 3 в. Это означает, что при довольно сильной межгодовой изменчивости каждого из этих параметров (особенно a_2 – см. табл. 5 а) имеется тенденция к сохранению формы кривой годового хода, так как в большинстве случаев a_1, a_2 одновременно увеличиваются или уменьшаются.

Формула (10) позволяет восстанавливать годовой ход по компонентам $a_k(t_j), \psi_k(t_j)$. Согласно табл. 3, 4 для воспроизведения основных особенностей достаточно использовать годовую и полугодовую гармоники и лишь для уточнения аномальных (по сложности формы) кривых в j -го года требуется учет компонентов более высокого порядка. Результаты аппроксимации в настоящей статье не приводятся, так как эта операция нужна не столько для описания климатической изменчивости, сколько для моделирования.

ВЫВОДЫ

1. Анализ многолетней изменчивости характеристик климата в районе ГМО Тикси указывает на ключевую роль годовой ритмики, одним из основных проявлений которой является годовой ход среднемесячных значений. Для описания годового хода температуры воздуха T , атмосферного давления P , абсолютной влажности A , общей облачности N и скорости ветра \vec{V} использована модель периодически коррелированного случайного процесса ПКСП, позволяющая учесть регулярные колебания – средний многолетний годовой ход $m(t)$ и стохастическую изменчивость параметров годовых циклов – модуляционная составляющая межгодовой изменчивости МС.

2. Оценки всех вероятностных характеристик указывают на различия изменчивости T, A с одной стороны и P, N, \vec{V} с другой стороны. Наиболее сильным и одновременно наиболее регулярным является годовой ход T и A , который объясняет более 85 % дисперсии среднемесячных значений, более 9/10 из которых приходится на $m(t)$. Основным проявлением МС у T и A является амплитудная модуляция. Годовой ход P, N, \vec{V} объясняет около 50 % дисперсии среднемесячных значений, которые распределяются между $m(t)$ и МС примерно поровну. При этом МС проявляется более сложно – помимо АМ, важны фазовая модуляция, изменчивость формы кривых годовых циклов и нере-

гулярные флуктуации. Для этих МЭ дисперсия межгодовой изменчивости, обусловленная годовым ходом (МС), многократно превосходит дисперсию среднегодовых значений (АС).

3. Годовой ход проявляется не только в среднем, но и в межгодовой изменчивости. Кривые $m(t)$ и $\sigma(t)$ различаются между собой и между различными МЭ не только количественно — размерами и фазой, но и качественно — по форме. У всех элементов в $m(t)$ и $\sigma(t)$ явно преобладает колебание с периодом 12 месяцев, при этом для A существенно асимметрия кривых $m(t)$ и $\sigma(t)$, а для P , \vec{V} и особенно для N — процессы внутрисезонного масштаба. Максимум $m(t)$ и $\sigma(t)$ всегда приходится на основные сезоны: на зиму — $m(t)$ для P , $\sigma(t)$ — для T , P , N или на лето — $m(t)$ для T , A , N , $\sigma(t)$ для A . Кривые $m(t)$ и $\sigma(t)$ синфазны у P , A и противофазны у T и N .

4. Для количественного описания $m(t)$ и $\sigma(t)$ использован компонентный метод в терминах оценок амплитуд и фаз гармоник Фурье годового хода вероятностных характеристик. Проведенный анализ показал, что для описания наиболее общих особенностей изменчивости достаточно учесть годовую и полугодовую гармоники, а для уточнения — дополнительно гармонику с периодом 4 месяца для N и с периодом 3 месяца для \vec{V} . В то же время для характеристики индивидуальных годовых циклов нужны все 4 гармоники.

5. Для уточнения свойств МС использованы ряды компонентов Фурье на годовых отрезках. Такое представление особенно ярко подчеркивает различие между T , A и P , N , \vec{V} . Если для описания МС для T , A достаточно учесть только амплитуды годовой и полугодовой гармоник, то для МС P , N и \vec{V} нужен учет амплитуд и фаз всех компонентов. В рядах межгодовой изменчивости амплитуд и фаз всех элементов, кроме N , не обнаружено однонаправленных тенденций. Обличность в среднем за год имеет тенденцию к увеличению, при этом происходит ослабление годового хода, а у фазы после 1975 г. усиливается дисперсия и происходит усложнение формы годового хода.

Вторым важным компонентом годовой ритмики является сезонная модуляция синоптических процессов, частично рассмотренная в работе [7]. Этому будет посвящена следующая статья настоящего цикла работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Рожков В.А. Закономерности годовой ритмики и межгодовой изменчивости температуры воздуха в высоких и умеренных широтах Северного полушария // Известия РГО. 1998. Т. 130. Вып. 3. С. 34–41.
2. Бельшиев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 264 с.
3. Боков В.Н., Бухановский А.В., Иванов Н.Е., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Пространственно-временная изменчивость поля ветра в умеренных широтах Северного полушария // Известия РАН. Серия Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 2. С. 170–181.
4. Боков В.Н., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Оценки межгодовой изменчивости скорости ветра над морем // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. С. 253–259.
5. Драган Я.П., Рожков В.А., Яворский И.Н. Методы вероятностного анализа ритмики гидрометеорологических процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 319 с.
6. Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Т. 1. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
7. Иванов Н.Е., Макшас А.П., Шутилин С.В., Гунн Р.М. Многолетняя изменчивость характеристик климата района гидрометеорологической обсерватории Тикси // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 24–41.
8. Иванов Н.Е., Рожков В.А. Климатическая изменчивость скорости ветра // Известия РГО. 1997. Т. 129. Вып. 3. С. 76–78.

9. Иванов Н.Е., Рожков В.А. Компонентное описание ритмики гидрометеорологических процессов // Вестник СПбГУ. 1996. Серия 7. Вып. 2 (№ 14). С. 66–79.
10. Лагун В.Е., Иванов Н.Е., Яговкина С.В. К вопросу о потеплении в районе Антарктического полуострова // Problemy klimatologii polarnej. 2006. № 16. Р. 23–45.
11. Рожков В.А. Теория вероятностей случайных событий, величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб.: Прогресс-Погода, 1996. 559 с.

N.E.IVANOV, A.P.MAKSHTAS, S.V.SHUTILIN

**LONG-TERM VARIABILITY OF CLIMATE CHARACTERISTICS
IN THE AREA OF TIKSI HYDROMETEOROLOGICAL OBSERVATORY.
PART 2. SEASONAL VARIABILITY**

Based on the created by the Arctic and Antarctic Research Institute and Tiksi Branch of Yakutian Administration of Roshydromet electronic archive of standard meteorological observations, executed on the polar station Tiksi since August 1932 until December 2007, the peculiarities of seasonal variability of air temperature, atmospheric surface pressure, absolute humidity, tenth of total cloudiness and wind velocity had been analyzed. The model of periodically correlated stochastic processes had been used for analysis. The main attention is placed to comparison of regular seasonal variability and interannual variations of its characteristics in the parametrical form.

Keywords: hydrometeorological observatory Tiksi, air temperature, atmospheric pressure, absolute humidity, wind velocity, cloudiness, seasonal variability, additive and modulation components of interannual variability.