

К ВОПРОСУ О ПОТЕПЛЕНИИ В РАЙОНЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА

ABOUT THE WARMING IN THE REGION OF THE ANTARCTIC PENINSULA

Виктор Е. Лагун¹, Николай Е. Иванов¹, Светлана В. Яговкина^{1,2}

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

² Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
ул. Карбышева 7, Санкт-Петербург, 194021 Россия
svetlana@main.mgo.rssi.ru

Аннотация. Задача настоящей работы заключается в уточнении методики статистического описания временной изменчивости температуры воздуха и атмосферного давления и оценке вероятностных характеристик их режима в диапазонах от межгодовых до внутрисуточных колебаний с учетом низкочастотной модуляции по данным приземных измерений в районе Антарктического полуострова. Основной вклад в суммарную дисперсию температуры воздуха и атмосферного давления вносят годовая ритмика и процессы синоптического масштаба, причем, если для температуры внутrigодовая изменчивость объясняет более 50% дисперсии, то для давления – менее 20%. Вклад в суммарную дисперсию изменчивости среднегодовых значений составляет менее 5%. Таким образом, модуляционная составляющая превосходит аддитивную составляющую по интенсивности. Проведенный статистический анализ данных срочных метеорологических измерений на станции Беллинсгаузен позволил количественно определить вклад процессов различного временного масштаба в формирование наблюдаемых изменений параметров климатического режима приземного слоя атмосферы в районе Антарктического полуострова. Полученные оценки показывают, насколько изменяется значение дисперсии температуры воздуха и давления при использовании данных с различным масштабом осреднения по времени.

Ключевые слова: температура воздуха, атмосферное давление, межгодовые и внутрисуточные колебания, Беллинсгаузен, Антарктический полуостров.

1. Введение

Проявление так называемого "глобального потепления" в Южном полушарии наиболее отчетливо зафиксировано в районе Антарктического полуострова как в приземном слое (Данилов и др. 2003, Кејна 2003, Кејна и Лагун 2004, Лагун 2001, 2003; Turner и др. 2005), так и в свободной атмосфере (Jagovkina и Lagun 2004, Marshall и др. 2002). По оценкам (IPCC 2001) этот регион наряду с северо-востоком Аляски и Восточной Сибирью является одной из важнейших "горячих точек" на планете, где рост средних годовых значений приземной температуры воздуха

превысил средние глобальные значения тренда в 3–4 раза. Количественное изучение механизмов формирования значительной климатической изменчивости в этом регионе требует сведений о статистической структуре метеорологических элементов. Такое исследование стало возможным в связи с созданием базы данных по климату Южной полярной области в рамках разрабатываемой в АНИИ геоинформационной системы (ГИС) “Антарктика” (Данилов и др. 2003) и международного проекта SCAR READER (Turner и др. 2004)

В работе уточнена методика статистического описания изменчивости температуры воздуха и атмосферного давления и получены оценки их вероятностных характеристик в диапазонах от межгодового до внутрисуточного по данным приземных измерений в районе Антарктического полуострова.

Исходными данными является полный ряд четырехсрочных в сутки измерений приповерхностной температуры воздуха и атмосферного давления на уровне моря на российской субантарктической станции Беллинсгаузен с 1969 по 2005 г., прошедший количественный контроль качества и тестирование на однородность временных рядов. Метеорологические измерения на станции Беллинсгаузен, расположенной на острове Кинг-Джордж из архипелага Южных Шетландских островов, проводятся непрерывно с 28 февраля 1968 г. практически на одной и той же площадке.

2. Методы оценки параметров статистической структуры

Многолетние временные ряды данных срочных гидрометеорологических измерений позволяют анализировать межгодовую изменчивость, годовую ритмику, внутрисезонную изменчивость, процессы синоптического масштаба и суточный ход. Поддиапазонный вероятностный анализ предполагает учет низкочастотной модуляции, проявляющейся в многолетних изменениях характеристик годовой ритмики, а также в сезонной и межгодовой изменчивости процессов синоптического и суточного хода. В работе Бокова и других (1993) эта модуляция трактуется как модуляционная составляющая (МС) межгодовой изменчивости в отличие от аддитивной составляющей (АС), представленной рядом среднегодовых значений. Модели случайной величины в терминах закона распределения вероятностей и его моментов, квантилей и экстремумов, стационарного случайного процесса в терминах математического ожидания m , дисперсии D и среднеквадратического отклонения (СКО) $\sigma = D^{0.5}$, ковариационной функции $K(\tau)$ и спектральной плотности $S(\omega)$ использованы для выявления наиболее общих закономерностей во всем частотном диапазоне, оценивания распределения дисперсии по диапазонам, анализа аддитивной составляющей и в качестве индикаторов годовой, суточной ритмики и изменчивости синоптического масштаба.

Адекватной математической моделью, учитывающей регулярную повторяемость годовых и суточных колебаний и стохастичность их параметров, является периодически коррелированный случайный процесс. Процесс называют периодически коррелированным (ПКСП), если его вероятностные характеристики инвариантны относительно сдвига на положительное число n периодов коррелированности T (1 год или 1 сутки). Основными вероятностными характеристиками ПКСП являются периодические по времени t функции математическое ожидание $m(t+nT)=m(t)$, дисперсия $D(t+nT)=D(t)$ и среднеквадратическое отклонение СКО $\sigma(t)=D^{0.5}(t)$, ковариационная функция $K(t_1+nT, t_2+nT)=K(t_1, t_2)$ или $K(t+nT, \tau)=K(t, \tau)$, где $t=t_1$, $\tau=t_2-t_1$. Функции $m(t)$, $D(t)$, $K(t, \tau)$, $S(\omega, t)$ называют когерентными характеристиками ПКСП, их получают по данным, взятым через период

коррелированности после предварительного центрирования на средние значения (т.е. на АС). Эти оценки позволяют определить наиболее общие закономерности модуляции – вид (амплитудная, фазовая), соотношение между АС и МС. Оценки компонентов Фурье m_k , D_k , $K_k(\tau)$, $S_k(\omega)$ относятся к основным вероятностным характеристикам ПКСП (Иванов и Рожков 1996), они используются для эффективного сжатия информации и являются основой для количественного описания процессов с годовой и суточной ритмикой.

Изменчивость синоптического масштаба целесообразно анализировать по ряду $\zeta^o(t)$, центрированному на АС и годовой ход среднемесячных значений. Сезонную модуляцию и межгодовую изменчивость интенсивности процессов синоптического масштаба можно проанализировать по временному ряду внутримесячной дисперсии $D_{\zeta^o}(t)$.

Синоптическая изменчивость в атмосфере представляет собой динамику (зарождение, перемещение, трансформацию и исчезновение) циклонов, антициклонов и бароклинных волн. Обусловленные этими процессами изменения метеорологических характеристик в фиксированной точке пространства представляют собой ее локальные проявления. Для их описания и параметризации целесообразно использовать модель случайного импульсного процесса в форме “штормов” и “окон погоды” (Рожков и др. 2000).

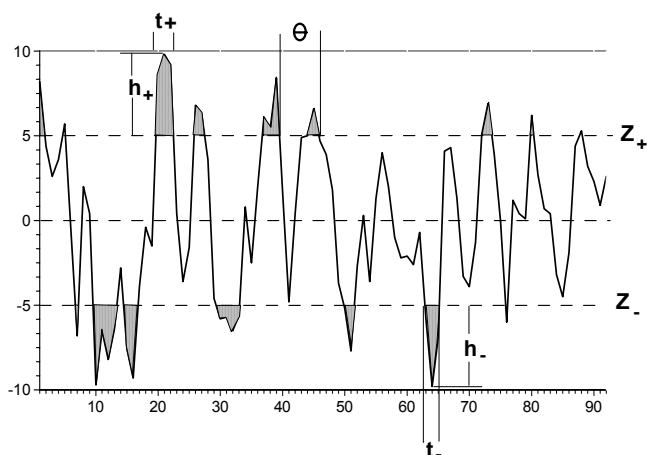


Рис. 1 Аномалии среднесуточной температуры воздуха на станции Беллинсгаузен в зимний сезон 1969 г. Параметры случайного импульсного процесса: Z_+ , Z_- – заданные уровни положительных и отрицательных аномалий; h_+ , h_- , τ_+ , τ_- , n_+ , n_- – мощность, продолжительность и количество “штормов” – положительных и отрицательных импульсов; соответственно, θ - продолжительность “окна погоды”

Fig. 1 Anomalies of daily surface air temperature. Bellinghshausen, winter season, 1969.

Stochastic impulse process parameters: “Storm” – the exceeding of prescribed level $\pm z$.
Storm parameters: N_+ , N_- – number of storms, h_+ , h_- – storm intensity τ_+ , τ_- – storm duration,
“Weather window” – time interval between consequent storms θ .

На рисунке 1 в качестве примера представлен пример сезонной реализации аномалии приземной температуры воздуха на станции Беллинсгаузен для зимы 1969 года, на которой отмечены характеристики импульсного процесса. “Шторм” означает выход $\zeta^o(t)$ за уровень $\pm z$, а “окно погоды” – промежуток между соседними штормами. Параметрами являются: интенсив-

ность штормов (высота положительных $h^+=\zeta-z^+$ и отрицательных $h^-=\zeta-z^-$ выбросов), продолжительность τ^\pm штормов и окон погоды θ^\pm . Один или несколько уровней z^\pm задают, например, на основании квантильного анализа или как критерии опасных или особо опасных явлений погоды.

Наибольший интерес представляют 5 квантилей – минимум X_{\min} , нижняя квартиль $X_{0.25}$, медиана $Me=X_{0.5}$, верхняя квартиль $X_{0.75}$, максимум X_{\max} , которые удобно представить графически в виде так называемого “ящичка с усами”. Несмотря на кажущуюся простоту, такое представление содержит довольно богатую информацию о распределении вероятностей. Квантили X_{\min} , X_{\max} есть крайние члены ранжированной выборки, задающие размах $R=X_{\max}-X_{\min}$, а Me , характеризует центр распределения. Другой характеристикой центра распределения является трехсреднее значение

$$TM = (X_{0.25} + 2Me + X_{0.75})/4.$$

Нижняя $X_{0.25}$ и верхняя $X_{0.75}$ квартили определены как медианы левой $X_{\min} \div X_{0.25}$ и правой $X_{0.5} \div X_{\max}$ половин ранжированной выборки. Квантили позволяют оценить параметры распределения вероятностей без учета положительных и отрицательных выбросов. Интерквартильное расстояние

$$Q = X_{0.75} - X_{0.25}$$

задает интервал, содержащий 50% всех значений выборки. “Усы” $X_{\min} \div X_{0.25}$ и $X_{0.75} \div X_{\max}$, определяют интервалы, содержащие по 25% наиболее крупных отрицательных и положительных аномалий. Еще одной характеристикой масштаба распределения является шаг, равный $1.5Q$. Ящик с усами можно дополнить внутренними барьерами, расположенными на расстоянии шага от верхней и нижней крышек “ящичка”, и внешними барьерами, расположенными на шаг дальше. Различия между (TM, Me) , а также (X_{\min}, Me) , (X_{\max}, Me) , $(X_{0.25}, Me)$, $(X_{0.75}, Me)$ являются оценками асимметрии As распределения в разных точках области значений X_i .

Для анализа аддитивной составляющей изменчивости используют аппроксимацию временных рядов среднегодовых и среднемесячных (за одноименный месяц) значений трендом. Линейный тренд $at+b$ определим как регрессионную модель (Дрейпер и Смит 1986)

$$\zeta(t) = \bar{\zeta} + at + b + \varepsilon(t)$$

В качестве основных параметров тренда приняты наклон a и дисперсия D_ε аномалий относительно тренда. Остаток $\varepsilon(t)$ обычно полагают стационарным процессом с нулевым математическим ожиданием. Однако нестационарность может проявляться не только через тренд математического ожидания $m(t) \neq \text{const}$, но и через непостоянство дисперсии $D(t) \neq \text{const}$.

Годовая ритмика сочетает в себе регулярную составляющую – средний многолетний годовой ход $m(t)$ и стохастическую составляющую – МС. Соотношение между ними можно оценить, сопоставив $A(\omega_0)$ на частотах годовой гармоник и ее обертонов с амплитудами $|m_k|$ соответствующих компонентов разложения кривой годового хода математического ожидания ПКСП $m(t)$ в ряд Фурье.

3. Результаты

В таблице 1 приведены средние значения m и оценки дисперсии D температуры воздуха и атмосферного давления при различном масштабе осреднения исходных данных. Из нее сле-

дует, что основной вклад в дисперсию вносят междумесячные D_m и междусуточные D_d изменения, причем в ряду температуры их вклад в дисперсию соизмерим, а в ряду давления вклад D_d почти в 5 раз больше вклада D_m . Вклад AC в суммарную дисперсию температуры и давления составляет менее 5%.

Таблица 1 – Table 1

Средние значения m температуры воздуха (T) и атмосферного давления на уровне моря (P) и оценки дисперсии D при различных масштабах осреднения данных срочных метеорологических измерений станции Беллинсгаузен за период 1969–2002 гг.

The means (m) of air temperature (T) and atmospheric pressure at sea level (P) and dispersion estimates (D) for different averaging scales due to current measurement results for Bellingshausen station, 1969–2002

Параметр Parameter	m		D, масштаб осреднения, N – длина ряда D – averaging scale, N – time-series length				
			Срочные Six-hourly	Среднесуточные Daily	Среднемесячные Monthly	Среднегодовые Annual	
			N = 49672	N = 12418	N = 408	N = 34	
T	°C	-2.4	°C ² %	21.6 100	19.7 92	11.3 52	0.7 3
P	гПа hPa	991.4	гПа ² – hPa ² %	152.0 100	141.4 93	27.4 18	2.8 2

°C², hPa² – размерность дисперсии – dispersion dimension

Для уточнения этого вывода рассмотрим оценки спектральной плотности в стационарном приближении, графики которых на рис. 2A-B приведены для наглядности в полулогарифмическом масштабе $S[\lg(\omega)]$. В оценке спектра температуры важнейшей особенностью является годовой ход, проявляющийся в виде мощного пика на частоте годовой гармоник и небольшого пика на частоте полугодового обертона. В низкочастотной области пик соответствует колебаниям с периодом около 5 лет, в высокочастотной области заметен небольшой пик, обусловленный суточным ходом. В оценке спектра давления относительный вклад годовой ритмики и изменчивость меньше, чем у температуры. В спектре, помимо годовой и полугодовой гармоник, представлена еще и 1/3-годовая гармоника. В низкочастотной области пик соответствует колебаниям с периодом около 2 лет, велика интенсивность внутрисезонной изменчивости (в диапазоне с периодами от 60-70 до 15 суток, где заметны пики на периодах около 60 и около 30 суток) и изменчивости синоптического масштаба (в диапазоне с периодами от 10-12 до 2 суток), а суточный ход не выражен. Расчет вклада в дисперсию по диапазонам выполнен в реальном масштабе частот. Межгодовые колебания объясняют около 3 % дисперсии температуры и давления, годовая ритмика объясняет около 35% дисперсии температуры (из них 95 % приходится на годовую гармонику) и всего 6% дисперсии давления (из них 3% приходится на годовую и 2% на полугодовую гармонику), внутрисезонные процессы объясняют 15% дисперсии T и 35% дисперсии P , изменчивость синоптического масштаба дает 21% дисперсии T и 35% дисперсии P , а суточный ход температуры объясняет всего 1% ее дисперсии, а для давления он ничтожно мал.

В таблице 2 приведен годовой ход средних значений $m(t)$ и оценок дисперсии $D(t)$, коэффициентов асимметрии $As(t)$ и эксцесса $Ex(t)$ для T и P , рассчитанных по срочным, среднесуточным и среднемесячным данным. Для давления суточный ход не выражен, поэтому данные всех сроков объединены. Из анализа табл. 2 видно, что в ряду приземной температуры воздуха

Таблица 2 – Table 2

Средние значения m [$^{\circ}\text{C}$], оценки дисперсии D [$^{\circ}\text{C}^2$] и коэффициентов асимметрии As и эксцесса Ex температуры воздуха

Mean values m [$^{\circ}\text{C}$], dispersion estimates D [$^{\circ}\text{C}^2$], asymmetry As and excess Ex of surface air temperature

Месяц Month	Срок* Time*	m	Срочные и среднесуточные Six-hourly and mean daily			Средние месячные Monthly		
			D, $^{\circ}\text{C}^2$	As**	Ex**	D, $^{\circ}\text{C}^2$	As**	Ex**
I	Ночь – Night	0.8	2.0	0.29	0.74	0.4	-0.33	0.20
	Утро – Morning	1.5	2.0	0.56	2.53	0.4	-0.15	-0.86
	День – Noon	2.3	2.3	0.12	0.67	0.4	0.02	-0.70
	Вечер – Evening	1.4	1.7	0.29	0.83	0.4	0.05	-0.51
	Сутки – Day	1.5	1.5	0.22	0.52	0.4	-0.08	-0.60
II	Ночь – Night	1.0	2.6	-0.39	0.55	0.4	-0.37	-0.98
	Утро – Morning	1.5	2.5	-0.50	0.50	0.4	-0.28	-0.72
	День – Noon	2.3	2.7	-0.70	0.58	0.5	-0.47	-0.90
	Вечер – Evening	1.4	2.6	-0.50	0.96	0.4	-0.31	-1.07
	Сутки – Day	1.6	2.1	0.65	-0.45	0.4	-0.36	-0.98
III	Ночь – Night	0.1	5.2	-0.97	2.21	0.8	-0.31	-0.36
	Утро – Morning	0.2	5.0	-0.97	2.61	0.7	-0.44	0.35
	День – Noon	0.9	4.9	-0.90	1.31	0.8	-0.22	-0.52
	Вечер – Evening	0.2	5.1	-0.97	1.66	0.8	-0.37	0.00
	Сутки – Day	0.3	4.1	-0.91	1.43	0.7	-0.35	-0.23
IV	Ночь – Night	-1.7	10.4	-1.04	0.89	2.1	-0.33	-0.59
	Утро – Morning	-1.8	10.5	-1.00	0.74	2.3	-0.43	-0.57
	День – Noon	-1.4	10.4	-1.09	1.15	2.3	-0.48	-0.58
	Вечер – Evening	-1.8	10.6	-0.98	0.74	2.3	-0.52	-0.53
	Сутки – Day	-1.7	8.9	-1.00	0.81	2.2	-0.43	-0.61
V	Ночь – Night	-3.8	18.3	-1.05	0.88	5.1	-0.53	-0.93
	Утро – Morning	-3.9	18.6	-1.03	0.83	4.7	-0.44	-0.84
	День – Noon	-3.7	17.6	-1.04	0.88	4.5	-0.52	-0.69
	Вечер – Evening	-3.9	18.4	-1.00	0.70	5.2	-0.56	-0.76
	Сутки – Day	-3.9	16.1	-1.05	0.99	4.8	-0.51	-0.82
VI	Ночь – Night	-5.6	24.7	-0.76	-0.16	5.1	-0.14	-0.73
	Утро – Morning	-5.7	24.9	-0.76	-0.10	5.3	-0.12	-0.96
	День – Noon	-5.5	23.8	-0.75	-0.20	4.9	-0.16	-0.76
	Вечер – Evening	-5.7	24.1	-0.70	-0.30	4.6	-0.19	-0.72
	Сутки – Day	-5.6	21.4	-0.72	-0.19	4.9	-0.13	-0.83
VII	Ночь – Night	-6.7	32.2	-0.77	-0.09	9.8	-0.61	-0.48
	Утро – Morning	-6.8	32.0	-0.77	-0.08	10.1	-0.72	-0.20
	День – Noon	-6.5	30.6	-0.71	-0.33	9.7	-0.62	-0.52
	Вечер – Evening	-6.7	32.3	-0.75	-0.18	10.3	-0.70	-0.39
	Сутки – Day	-6.7	28.2	-0.74	-0.14	9.9	-0.67	-0.38
VIII	Ночь – Night	-6.5	30.8	-0.74	-0.36	6.1	-0.40	-0.71
	Утро – Morning	-6.6	31.6	-0.73	-0.45	5.8	-0.33	-0.60
	День – Noon	-6.0	27.9	-0.81	-0.30	5.4	-0.51	-0.49
	Вечер – Evening	-6.4	29.8	-0.76	-0.35	5.9	-0.43	-0.73
	Сутки – Day	-6.4	26.3	-0.78	-0.31	5.7	-0.42	-0.63
IX	Ночь – Night	-4.8	20.6	-1.12	0.91	3.4	-0.14	-0.63
	Утро – Morning	-4.7	20.6	-1.09	0.66	3.6	-0.36	-0.65
	День – Noon	-3.9	17.2	-1.21	1.02	3.2	-0.31	-0.81
	Вечер – Evening	-4.6	19.1	-1.07	0.74	3.2	-0.10	-0.79
	Сутки – Day	-4.5	16.5	-1.11	0.86	3.3	-0.20	-0.77

Месяц Month	Срок* Time*	m	Срочные и среднесуточные Six-hourly and mean daily			Средние месячные Monthly		
			D, °C ²	As**	Ex**	D, °C ²	As**	Ex**
X	Ночь – Night	-3.0	8.7	-1.06	0.97	2.0	-0.49	0.14
	Утро – Morning	-2.6	7.9	-1.19	1.27	2.0	-0.53	0.58
	День – Noon	-2.0	7.1	-1.28	1.64	1.7	-0.55	1.64
	Вечер – Evening	-2.7	7.8	-1.14	1.35	1.8	-0.44	0.79
	Сутки – Day	-2.6	6.7	-1.14	1.26	1.8	-0.49	0.82
XI	Ночь – Night	-1.6	4.1	-1.38	3.70	0.7	-0.56	-0.69
	Утро – Morning	-1.0	3.2	-1.08	1.88	0.7	-0.53	-0.66
	День – Noon	-0.6	2.8	-1.30	2.61	0.6	-0.60	-0.57
	Вечер – Evening	-1.2	3.1	-1.04	1.81	0.6	-0.53	-0.58
	Сутки – Day	-1.1	2.6	-1.19	1.88	0.6	-0.62	-0.50
XII	Ночь – Night	-0.1	1.7	-0.19	1.88	0.3	-0.01	-0.30
	Утро – Morning	0.5	1.5	-0.08	1.54	0.2	-0.20	-0.30
	День – Noon	1.2	1.6	0.30	1.21	0.3	-0.26	-0.72
	Вечер – Evening	0.5	1.5	0.30	1.47	0.3	-0.26	-0.18
	Сутки – Day	0.5	1.2	0.03	0.71	0.3	-0.08	-0.09

Примечание к таблице.

* – Сроки измерения в таблице 2 и далее даны по местному времени,

** – В таблицах 2–3 выделены случаи, когда гипотеза о нормальном распределении 34-летней выборки должна быть отвергнута на 95% уровне по критериям $|As| > 0.63$, $|Ex| > 1.10$.

Примечание к таблице.

* – Observations time in Table 2 is presented as local time,

** – In tables 2-3 the causes are indicated while normal distribution hypothesis for 34 years time-series can be rejected at 95 % level according to following criteria $|As| > 0.63$, $|Ex| > 1.10$.

регулярный годовой ход $m(t)$ имеет максимум в январе и минимум в июле. Форма годового хода $D(t)$, вычисленного по срочным и по среднемесячным данным, с максимумом в июле и минимумом в декабре примерно одинакова, т.е. $m(t)$ и $D(t)$ находятся в противофазе. Согласно данным таблицы 3, в годовом ходе $m(t)$ в ряду давления помимо главного максимума в мае и главного минимума в ноябре отмечаются вторичный максимум в январе и вторичный минимум в феврале. Различие формы годового хода $D(t)$ по срочным и по среднемесячным данным подчеркивает важную роль изменчивости синоптического масштаба. Дисперсия среднемесячных данных максимальна в июле, минимальна в январе, вторичный максимум приходится на сентябрь, а вторичный минимум – на январь.

Дисперсия срочных данных максимальна в сентябре, минимальна в январе, вторичные экстремумы отсутствуют, выделяется два неодинаковых по продолжительности отрезка – увеличение $D(t)$ с января по сентябрь и уменьшение $D(t)$ с сентября по январь.

На рис. 2С-2D годовой ход среднемесячных и среднесуточных значений температуры воздуха и давления представлен квантилями в форме “ящичков с усами”. Из этих рисунков следует, что для среднемесячных значений T и P годовой ход медианы $Me(t)$ и интерквартильного расстояния $Q(t)$ в основных чертах совпадает с годовым ходом $m(t)$, $\sigma(t)$ соответственно. В ряду температуры во все месяцы, кроме ноября – января и марта медиана расположена внутри ящика несимметрично, а именно ближе к его верхней крышке $X_{0.75}$, чем к нижней $X_{0.25}$. Длина верхнего (25% значительных положительных аномалий $X_{0.75} - X_{0.25max}$) и нижнего (25% значительных отрицательных аномалий $X_{min} - X_{0.25}$) усов в большинстве месяцев примерно одинакова.

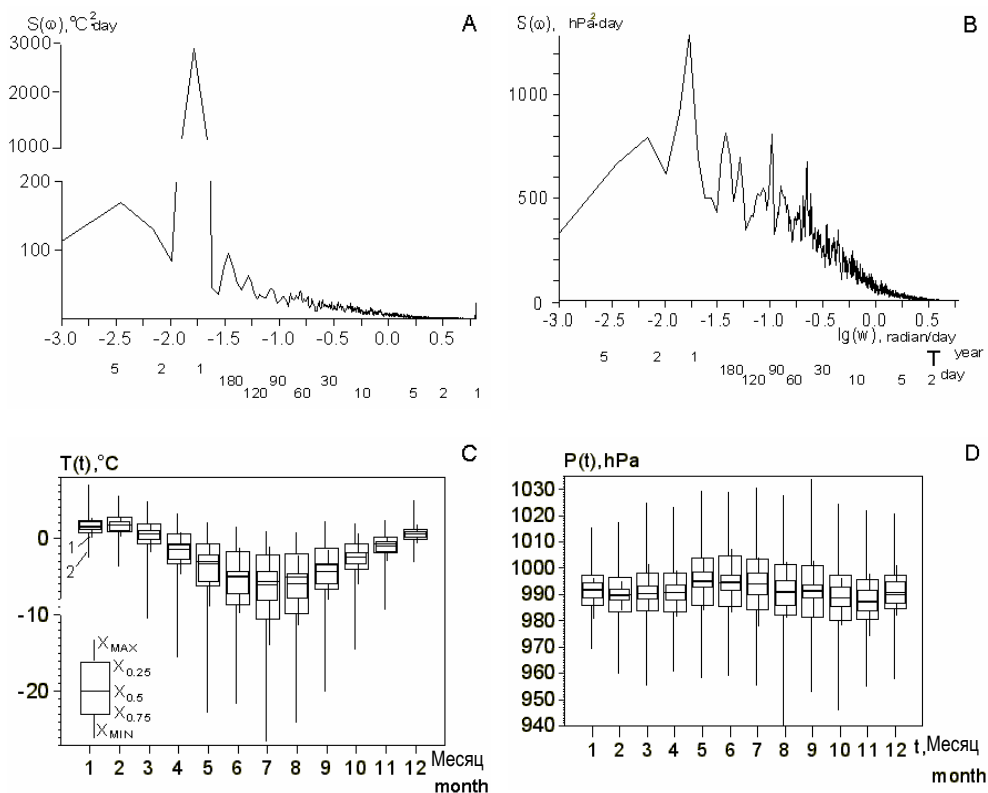


Рис. 2. Вероятностные характеристики поддиапазонной изменчивости температуры воздуха $T(t)$, (левая колонка) и атмосферного давления $P(t)$, (правая колонка): оценки спектральной плотности по данным срочных измерений (А, В) и годовой ход квантилей распределения (С, D), вычисленных по среднемесячным (1) и среднесуточным (2) данным

Fig. 2. Probabilistic characteristics of intrarange variability surface air temperature $T(t)$ (left column) and atmospheric pressure $P(t)$ (right column): estimates of spectral density based on current data (A, B) and annual course of quantile distribution (C, D) using monthlyly (1) and daily (2) data

В ряду атмосферного давления небольшое нарушение симметрии Me относительно $X_{0.75}$, $X_{0.25}$ и равенства длины верхнего и нижнего усов характерны для месяцев теплого сезона. Соотношение между высотой ящика и длиной усов изменяется в течение года у температуры незначительно, а у давления более сильно, так что в теплый сезон 50% среднемесячных значений в окрестностях центра распределения ($X_{0.25} \div X_{0.75}$) занимают несколько большую часть интервала $X_{min} \div X_{max}$, чем в холодный сезон. Оценки квантилей распределения среднесуточных данных подчеркивают большой вклад процессов синоптического масштаба в общую дисперсию. Увеличение Q и R для T в синоптическом диапазоне по сравнению с межгодовым диапазоном особенно сильно выражено в холодный сезон, асимметрия, в основном, проявляется для аномальных значений (нижний ус длиннее верхнего) и заметна во все месяцы, кроме декабря–февраля. Для ряда атмосферного давления соотношения между Q и R стабильны в течение года, распределение близко к симметричному. Годовые максимумы среднемесячных значений температуры отмечаются с января по март при наибольшей повторяемости в январе–феврале, а минимумы с апреля по сентябрь при наибольшей повторяемости в июле. Распределение по

месяцам годовых экстремумов среднемесячных значений давления сложнее, максимумы фиксировались в декабре-январе и марте-августе при наибольшей повторяемости в мае-июне, а минимумы во все месяцы, кроме февраля и мая при наибольшей повторяемости в ноябре. Отметим, что в одни и те же месяцы (декабрь-январь, март-апрель и июнь-сентябрь) отмечались в различные годы как минимумы так и максимумы атмосферного давления. В годовом ходе экстремумов срочных значений эти особенности проявляются еще более отчетливо.

Таблица 3 – Table 3

Средние значения m [гПа] и оценки дисперсии D [гПа²] и коэффициентов асимметрии As и эксцесса Ex атмосферного давления

Mean values m [°C], dispersion estimates D [°C²], asymmetry As and excess Ex of atmospheric pressure

Месяц Month	m	Срочные* – Six-hourly*			Средние месячные* – Monthly*		
		$D, °C^2$	As	Ex	$D, °C^2$	As	Ex
I	991.4	76.6	-0.09	0.29	12.5	-0.80	0.23
II	989.9	99.9	0.05	0.05	8.7	-0.15	-0.78
III	990.8	125.5	0.00	-0.13	17.7	0.56	0.18
IV	990.7	133.7	-0.03	-0.14	16.9	0.09	-0.48
V	994.9	170.2	-0.02	0.31	25.4	-0.24	-0.64
VI	994.6	172.0	-0.11	-0.50	33.3	0.04	-0.26
VII	994.0	192.5	-0.05	-0.34	34.4	-0.41	0.08
VIII	991.3	192.4	-0.16	-0.22	33.1	0.21	-0.89
IX	991.6	198.2	-0.09	-0.42	22.3	0.26	0.27
X	988.7	167.6	-0.12	-0.07	18.0	-0.25	-0.34
XI	987.8	131.5	-0.09	-0.07	29.8	-0.17	-0.35
XII	990.8	107.7	-0.08	0.18	29.7	0.18	-1.02

Примечание: Среднемесячные значения давления определены по среднесуточным данным, а параметры распределения срочных значений – по данным за все 4 срока, собранным в единую выборку.

Comment: Monthly means of pressure were determined from daily mean data, distribution parameters for current values are obtained from six hourly data collected into united selection.

В табл. 4–5 и на рис. 3А приведены оценки наклона линейного тренда a^* , их статистической значимости на 95% уровне и дисперсии относительно тренда D_{ϵ^*} для среднегодовых и среднемесячных значений температуры и давления.

Из таблицы 4 следует, что в ряду приземной температуры тренд математического ожидания среднегодовых и среднемесячных значений во все сезоны, кроме осени, положителен и усилен в летние месяцы, когда его вклад в дисперсию достигает 33% в январе и 18 % в феврале. В остальные месяцы он не превышает 10%. Значимы тренды среднегодовых и среднемесячных значений в январе, феврале и августе. Таблица 5 показывает, что тренд среднегодовых значений атмосферного давления отрицателен, а у среднемесячных значений – знакопеременный. Значимы тренды только в январе, когда он объясняет 40% дисперсии и у среднегодовых значений, а в остальные месяцы вклад тренда в дисперсию менее 10 %. Из графика аномалий $\Delta P(t)$ относительно тренда математического ожидания видно, что в январе понижение давления сопровождается тенденцией к усилению межгодовых флуктуаций.

Таблица 4 – Table 4

Средние значения m , оценки среднеквадратического отклонения σ , наклона a линейного тренда и дисперсии аномалий D_{ε} относительно тренда среднемесячных, среднегодовых значений и параметров синоптической изменчивости температуры воздуха. Выделены незначимые на 95% уровне тренды.

Mean values m [°C], mean square deviation estimates σ , linear trend parameter a and dispersion anomalies D_{ε} relative to trend of monthly and annual values and synoptic variability parameters of surface air temperature. Insignificant trend at 95% level is indicated

Характеристика Parameter	Месяц – Month												Год Year	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
Среднемесячная температура* – Mean monthly temperature*														
1969–2002 гг.														
a	°C/год	0.036	0.028	0.024	0.042	0.062	0.056	0.036	0.087	-0.012	-0.009	0.007	0.013	0.031
D_{ε}/D	%	67	82	92	92	92	94	99	87	99	99	99	94	86
1969–2000 гг.														
a	°C/год	0.041	0.035	0.034	0.048	0.071	0.086	0.045	0.073	-0.031	0.001	0.009	0.014	0.036
D_{ε}/D	%	63	72	86	91	91	87	98	92	98	99	99	94	84
Синоптический диапазон** – Synoptic diapason **														
D_j														
m	°C ²	1.9	2.4	4.4	8.2	13.4	19.3	21.9	24.2	16.2	6.2	2.8	1.5	10.2
σ	°C ²	0.8	1.0	2.4	4.5	8.7	9.8	11.5	11.8	11.5	3.9	1.7	0.56	2.9
a	°C ² /год	-0.001	-0.004	-0.019	-0.055	-0.145	-0.257	-0.202	-0.466	0.029	0.029	-0.019	0.002	-0.093
D_{ε}/D	%	99	99	99	99	97	93	97	84	99	99	99	99	90
N⁺ ***														
m	-	0.8	0.6	1.3	2.6	3.9	5.6	5.9	6.3	4.9	1.7	0.3	0.5	34.5
σ	-	1.0	0.8	1.6	2.3	2.6	2.1	2.4	2.8	2.9	2.3	0.6	0.7	8.4
a	год ⁻¹	(-0.009)	(0.011)	-0.043	-0.023	-0.087	-0.049	-0.016	-0.081	-0.060	0.007	(-0.006)	(-0.006)	-0.360
D_{ε}/D	%	(99)	(98)	93	99	89	94	99	92	96	99	(99)	(96)	82
h⁺														
m	°C	4.7	4.6	4.5	4.6	5.2	5.4	5.7	5.8	5.0	1.6	4.3	4.5	-***
σ	°C	1.1	0.8	0.7	0.8	1.3	1.4	1.7	1.6	1.2	0.6	0.6	0.6	-
a	°C/год	(0.004)	(0.014)	-0.009	-0.010	-0.020	-0.003	-0.011	-0.027	0.008	-0.001	(-0.022)	(0.010)	-
D_{ε}/D	%	(99)	(97)	98	98	98	99	99	95	99	99	(90)	(98)	-
τ^+														
m	час	7.5	6.9	8.5	14.9	24.9	24.9	25.3	27.7	21.6	14.8	6.	7.0	-
σ	час	3.5	2.3	3.7	13.6	27.3	23.8	24.8	28.7	25.2	17.0	0	2.3	-
a	час/год	(0.018)	(-0.032)	0.064	-0.142	-0.173	-0.032	-0.373	-0.110	0.076	0.217	(0.000)	(0.022)	-
D_{ε}/D	%	(99)	(98)	97	99	99	99	98	99	99	99	(99)	(99)	-
N⁻ ***														
m	-	0.1	0.3	1.5	3.6	4.6	5.8	6.0	6.2	5.0	3.3	1.2	0.1	37.8
σ	-	0.4	0.6	1.3	2.2	2.1	1.6	2.8	2.2	2.2	2.3	1.3	0.4	7.7
a	год ⁻¹	-	(-0.002)	-0.017	-0.049	-0.092	0.057	-0.029	-0.049	0.009	0.004	(-0.003)	(-0.006)	-0.179
D_{ε}/D	%	-	(99)	98	95	81	87	99	95	99	99	(99)	(98)	95
h⁻														
m	°C	-4.9	-5.2	-5.4	-6.1	-6.7	-7.1	-7.6	-7.6	-7.3	-5.9	-5.9	-5.2	-
σ	°C	1.0	1.0	1.4	1.6	2.0	2.4	2.7	2.8	2.7	1.6	1.7	0.9	-
a	°C/год	-	(-0.025)	0.030	-0.020	0.012	0.043	-0.007	0.034	0.023	-0.022	(0.004)	(-0.046)	-
D_{ε}/D	%	-	(88)	92	98	99	97	99	99	99	98	(99)	(53)	-
τ^-														
m	час	6.0	1.0	13.3	16.6	24.5	23.4	25.0	26.7	22.9	14.7	10.5	6.0	-
σ	час ²	0	5.2	13.3	13.4	24.5	21.9	26.1	26.1	25.7	13.6	9.0	0	-
a	час/год	-	(-0.144)	-0.027	.198	0.182	-0.290	-0.213	-0.235	-0.030	0.190	(-0.124)	(0.000)	-
D_{ε}/D	%	-	(87)	99	98	99	98	99	99	99	98	(98)	(100)	-

Примечание к таблицам 4–5: * – значения m , σ среднемесячной температуры приведены в таблице 2.
** – в качестве параметров в синоптическом диапазоне использованы дисперсия внутримесячной изменчивости D_j , количество N^{\pm} , интенсивность h^{\pm} и продолжительность τ^{\pm} положительных (+) и отрицательных (-)

Таблица 5 – Table 5

Средние значения m , оценки среднеквадратического отклонения σ , наклона a линейного тренда и дисперсии аномалий D_{ε} относительно тренда среднемесячных, среднегодовых значений и параметров синоптической изменчивости атмосферного давления. Выделены незначимые на 95% уровне тренды.

Mean values m [°C], mean square deviation estimates σ , linear trend parameter a and dispersion anomalies D_{ε} relative to trend of monthly and annual values and synoptic variability parameters of atmospheric pressure. Insignificant trend at 95% level is indicated

Характеристика Parameter		Месяц – Month												Год Year
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Среднемесячное давление – Mean monthly pressure														
1969–2002 гг.														
a	гПа/год	-0.226	0.033	-0.007	0.047	0.046	-0.60	-0.135	-0.099	0.124	-0.125	-0.107	-0.180	-0.058
D_{ε}/D	%	60	99	99	99	99	99	95	97	93	91	96	89	88
1969–2000 гг.														
a	гПа/год	-0.235	0.073	0.003	0.092	0.042	-0.035	-0.183	-0.116	0.078	-0.134	-0.102	-0.169	-0.058
D_{ε}/D	%	62	95	99	96	99	99	92	96	97	92	97	91	89
Синоптический диапазон – Synoptic diapason														
D_j														
m	гПа ²	63.1	90.5	106.7	116.2	1443.0	139.1	156.5	159.2	175.0	148.7	101.7	77.7	123.2
σ	гПа ²	18.9	41.9	33.4	37.0	64.6	58.6	600.6	67.3	49.0	77.3	47.3	33.6	16.9
a	гПа ² /год	-0.026	0.633	0.291	-0.170	0.166	-0.206	-0.160	0.028	-1.645	-1.326	0.030	0.301	0.131
D_{ε}/D	%	99	98	99	99	99	99	99	99	89	97	95	99	99
N^+														
m	-	1.0	1.8	1.1	1.7	2.3	2.5	2.6	2.4	3.0	2.6	1.6	1.6	24.1
σ	-	0.9	0.8	0.8	1.1	1.0	1.1	1.2	1.1	1.3	1.2	0.9	1.1	3.9
a	год ⁻¹	0.000	0.021	0.006	0.000	-0.036	-0.020	0.015	-0.024	0.011	0.013	-0.004	0.000	0.000
D_{ε}/D	%	100	93	99	100	87	99	99	95	99	99	100	100	100
h^+														
m	гПа	17.4	18.0	19.0	19.2	20.3	19.2	19.9	20.1	20.5	19.7	18.8	17.6	-
σ	гПа	3.2	3.5	3.9	3.8	5.1	5.0	4.9	5.0	5.3	4.9	4.6	3.2	-
a	гПа/год	-0.007	0.039	0.005	-0.036	0.075	0.003	-0.012	0.065	-0.045	0.053	0.059	0.081	-
D_{ε}/D	%	99	99	99	99	98	99	99	99	99	99	98	93	-
τ^+														
m	час	32.6	34.9	38.8	36.1	46.2	37.4	41.8	41.0	40.2	38.7	33.1	29.0	-
σ	час	29.7	31.1	37.2	28.2	47.3	30.5	27.8	34.2	34.3	36.1	30.4	22.4	-
a	час/год	-0.341	0.184	0.196	0.184	0.588	-0.101	-0.624	0.29	-0.254	-0.235	0.459	0.295	-
D_{ε}/D	%	99	99	99	99	98	99	97	99	99	99	98	98	-
N^-														
m	-	1.5	2.4	2.7	3.1	2.8	3.3	3.6	3.8	3.6	3.9	3.0	1.8	35.6
σ	-	1.0	1.1	1.2	1.6	1.2	1.8	1.6	1.7	1.9	1.5	1.3	1.3	5.4
a	год ⁻¹	0.016	-0.022	-0.012	-0.010	-0.005	0.039	0.051	0.009	-0.061	0.021	-0.006	0.026	0.045
D_{ε}/D	%	98	96	99	99	99	95	90	99	89	98	99	96	99
h^-														
m	гПа	-17.6	-19.2	-20.3	-20.9	-21.2	-21.6	-21.6	-21.5	-22.6	-21.2	-19.3	-19.2	-
σ	гПа	2.6	4.6	5.1	6.0	6.1	6.0	6.2	6.7	7.0	6.2	4.6	4.3	-
a	гПа/год	0.015	-0.009	-0.012	-0.012	0.091	0.025	-0.036	0.027	0.072	-0.009	-0.109	0.011	-
D_{ε}/D	%	99	99	99	99	98	99	99	99	99	99	94	99	-
τ^-														
m	час	18.2	20.8	21.9	24.5	27.8	26.4	26.6	25.2	28.1	26.4	20.3	22.3	-
σ	час ²	10.6	14.9	16.9	20.6	24.7	25.0	23.3	23.7	21.2	22.0	17.4	17.6	-
a	час/год	-0.140	0.132	0.162	0.210	-0.194	-0.606	-0.213	0.057	-0.025	0.190	0.313	-0.305	-
D_{ε}/D	%	98	99	99	99	99	95	99	99	99	99	97	97	-

штормов. *** – для N^{\pm} вместо среднегодовых значений использованы годовые суммы. Среднегодовые значения параметров h , τ не определены, поскольку аномалии 10% обеспеченности фиксировались не каждый год. По этой же причине оценки трендов в XI–XII (среднее $N^{\pm} < 1$) ненадежны.

Размах годового хода коэффициента наклона тренда среднемесячных значений температуры и давления превышает по абсолютной величине коэффициент наклона тренда среднегодовых значений, что указывает на вклад МС в межгодовую изменчивость по сравнению с АС.

В табл. 6, 7 и на рис. 3 приведены оценки параметров трендов составляющих МС годовой ритмики. Амплитуда $|a_1|$ годового хода T не имеет тренда, тренды параметров первой и второй гармоник годового хода P незначимы на 95% уровне. Отметим, что понижение с 1969 по 2005 гг. среднегодовых значений давления сопровождается тенденциями к увеличению $|a_1|$ и к уменьшению $|a_2|$.

Таблица 6 – Table 6

Средние значения m , оценки среднеквадратического отклонения σ , наклона a^* ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$) линейного тренда и дисперсии аномалий D_{ε} относительно тренда параметров годового хода характеристик модуляционной составляющей межгодовой изменчивости температуры воздуха

Mean values m , mean square deviation σ estimates, linear trend parameter a ($^{\circ}\text{C}/\text{year}$) and dispersion anomalies D_{ε} relative to trend of annual course of modulation component of surface air temperature interannual variability

Годовой ход среднемесячных значений** – Annual course of mean monthly values **												
k	$ m_k $, $^{\circ}\text{C}$				C_k^2							
	m	σ	a	D_{ε}/D	m	σ	a	D_{ε}/D				
1	4.2	0.9	-0.012	99	0.84	0.09	0.001	99				
Годовой ход внутримесячной дисперсии D_j^{**} Annual course of intramonthly dispersion D_j^{**}												
k	m	σ	a	D_{ε}/D	m	σ	a	D_{ε}/D	M	σ	a	D_{ε}/D
	$ m_k $				φ_k				C_k^2			
1	11.5	4.2	-0.092	90	6.0	0.6	-0.001	99	0.79	0.13	-0.002	97
2	4.3	2.4	-0.135	90	0.3	1.2	-0.005	99	0.11	0.07	0.000	100

Примечание к таблице 6.

* – Выделены тренды, незначимые на 95% уровне.

** – Параметры годового хода: $|m_k|$ и φ_k – амплитуда и фаза годовой ($k=1$) и полугодовой ($k=2$) гармоник, C_k^2 – вклад k -ой гармоники в дисперсию годового хода среднемесячных значений.

Comments to Table 6

* – Insignificant trend at 95% level is indicated.

** – Annual course parameters: $|m_k|$ and φ_k – are amplitude and phase of annual ($k=1$) and semi-annual ($k=2$) harmonics,

C_k^2 – is the input of k -harmonic into dispersion of annual course of monthly mean values.

Comments to Tables 4–5:

* – monthly means of surface temperature m and σ are presented in Table 2.

** – synoptic diapason parameters are intramonthly dispersion D_j , number N^{\pm} , intensity h^{\pm} and duration τ^{\pm} of positive (+) and negative (-) storms.

*** – numbers N^{\pm} are determined by annual sums. Annual values of h and τ parameters are not determined because 10 % provision anomalies are not found for all years. Due to the same reasons trend estimates for XI-XII ($N^{\pm} < 1$) are not reliable.

Роль синоптического диапазона обусловлена большим вкладом в общую дисперсию и тем, что именно в этом диапазоне формируются многолетние экстремумы. Для описания синоптической изменчивости помимо традиционного анализа данных измерений в стационарном приближении используем ряды внутримесячной дисперсии $D_{\zeta^o}(t)$ аномалий $\zeta^o(t)$ срочных значений относительно АС и годового хода среднемесячных значений и модель случайного импульса в форме последовательности штормов и окон погоды с параметрами $h^{\pm}(t)$, $\tau^{\pm}(t)$. В качестве критерия выделения штормов примем уровень z^{\pm} , соответствующий аномалиям 10% обеспеченности. В ряду давления $|z^-| \cong |z^+|$, а в ряду температуры, распределение которой асимметрично, $|z^-| > |z^+|$.

Годовая ритмика представлена на рисунке 4 “ящиками с усами” годового хода квантилей и экстремумов параметров изменчивости синоптического масштаба. Из него следует, что годовая ритмика всех параметров хорошо выражена и имеет у Т и Р много общего. Увеличение в холодный сезон внутримесячной дисперсии D и ее межгодовой изменчивости в значительной степени связано с увеличением как общего количества N^{\pm} штормов, так и интенсивности индивидуальных штормов h^{\pm} .

Увеличение в холодный сезон внутримесячной дисперсии D и ее межгодовой изменчивости в значительной степени связано с увеличением как общего количества N^{\pm} штормов, так и интенсивности индивидуальных штормов h^{\pm} . Такой же годовой ход характерен и для продолжительности штормов τ^{\pm} . Параметры h^{\pm} и τ^{\pm} связаны прямой стохастической зависимостью, расчет показал, что корреляция $r_{h^{\pm}, \tau^{\pm}} \cong 0.7$ для Т и для Р. Асимметрия для ряда месяцев проявляется на графиках в виде расположения медианы вблизи от верхней или нижней “крышки” “ящика”, но главным источником асимметрии являются аномально интенсивные выбросы, что проявляется через соотношение между длинами верхнего, нижнего “усов” и интерквартильным расстоянием.

Таблица 7 – Table 7

Средние значения m , оценки среднеквадратического отклонения σ , наклона a^* (гПа/год) линейного тренда и дисперсии аномалий D_{ε} относительно тренда параметров годового хода характеристик модуляционной составляющей межгодовой изменчивости атмосферного давления

Mean values m , mean square deviation σ estimates, linear trend parameter a (hPa/year) and dispersion anomalies D_{ε} relative to trend of annual course of modulation component of atmospheric pressure interannual variability

Годовой ход среднемесячных значений** – Annual course of mean monthly values**													
k	m _k				φ _k				C _k ²				
	m	σ	a	D _ε /D	m	σ	a	D _ε /D	m	σ	a	D _ε /D	
1	3.4	1.6	0.037	95	4.8	2.2	-0.023	99	0.23	0.15	0.004	93	
2	2.8	1.4	-0.045	90	0.5	1.4	0.044	90	0.18	0.15	-0.005	90	
Годовой ход внутримесячной дисперсии Dj** Annual course of intramonthly dispersion Dj**													
k	m _k				φ _k				C _k ²				
	m	σ	a	D _ε /D	m	σ	a	D _ε /D	m	σ	a	D _ε /D	
1	51.1	17.2	-0.341	96	6.6	1.3	0.014	99	0.55	0.20	-0.008	85	
2	31.2	13.4	0.429	90	2.3	1.1	-0.003	99	0.20	0.12	0.004	87	

Обозначения см. табл. 6 – For symbols see Table 6.

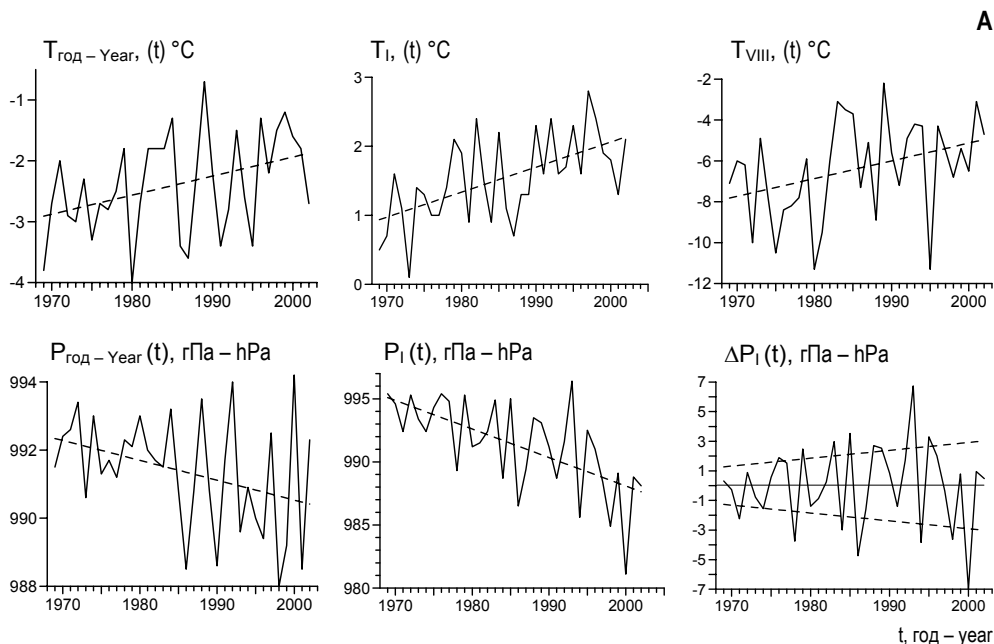
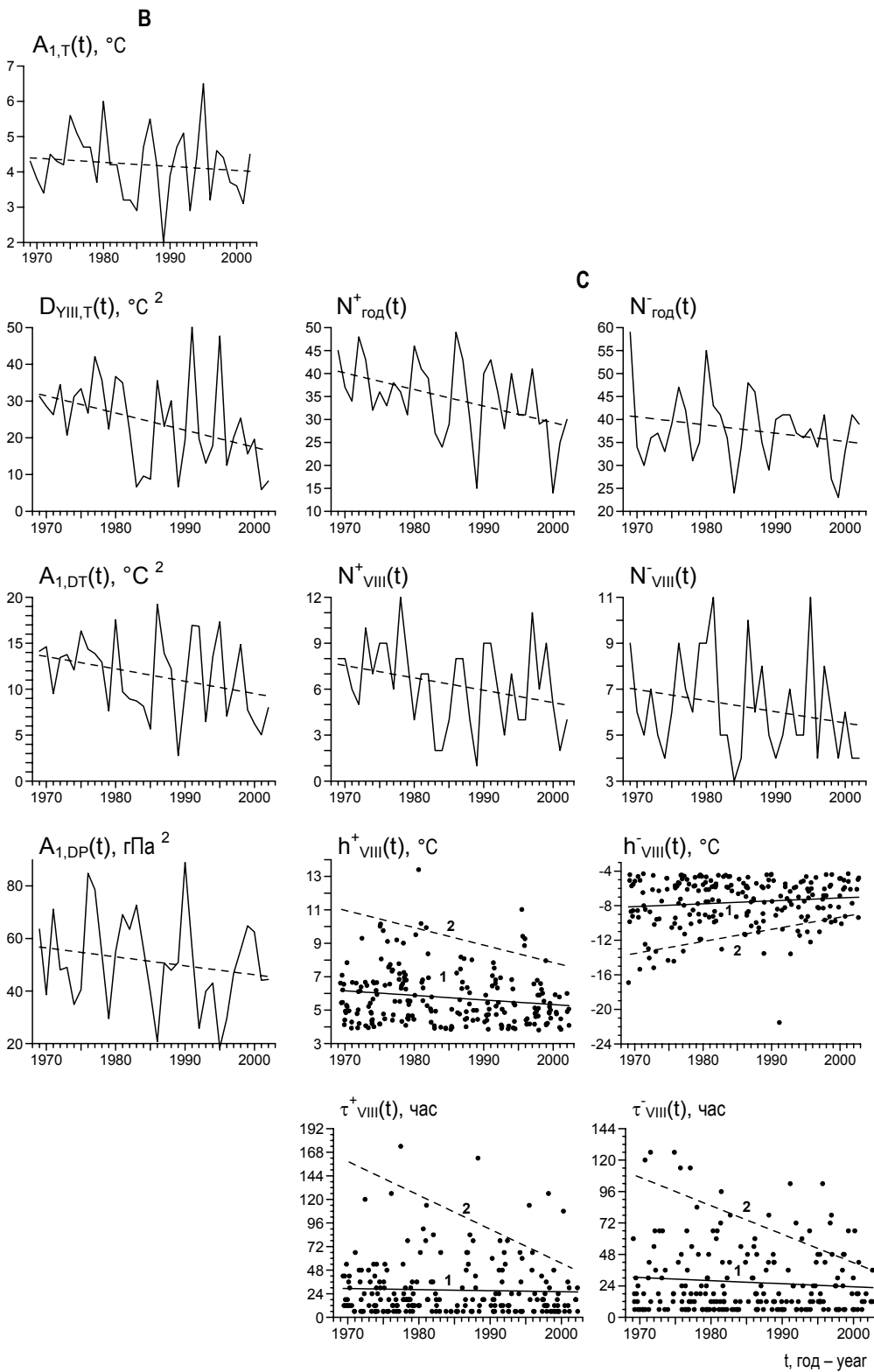


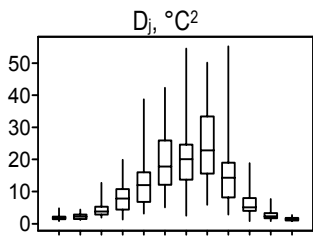
Рис. 3. Тренды аддитивной составляющей и параметров модуляционной составляющей межгодовой изменчивости температуры воздуха (Т) и атмосферного давления (Р).

- А – тренды математического ожидания среднегодовых (год) и среднемесячных (январь I, август VIII) значений Т и Р и тренд дисперсии давления в январе ΔP_I ;
 В – тренды амплитуды первой гармоники годового хода температуры $A_{1,T}$, внутримесячной дисперсии температуры в августе $D_{VIII,T}$ и амплитуды первой гармоники годового хода внутримесячной дисперсии температуры $A_{1,DT}$ и давления $A_{1,DP}$;
 С – количество (N), интенсивность (h) и продолжительность (τ) положительных (+) и отрицательных (-) аномалий температуры за год и в августе, 1 – все аномалии, 2 – крупные аномалии

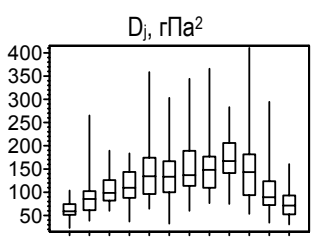
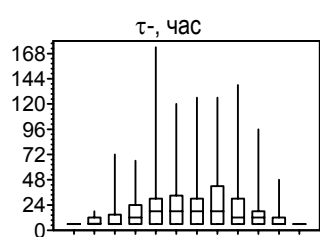
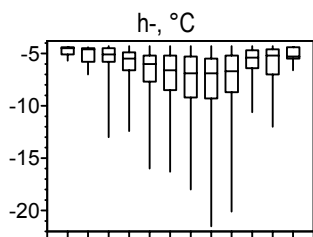
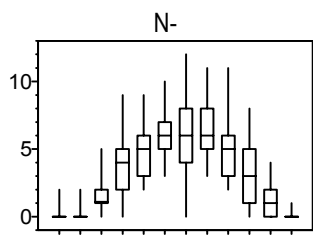
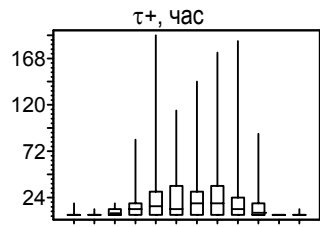
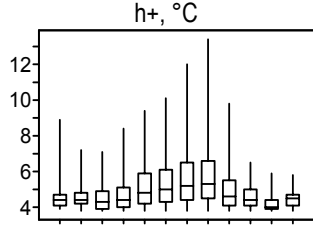
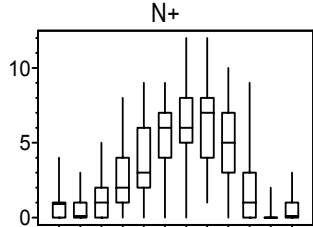
Fig. 3. Trends of additive component and of modulation component of surface air temperature (T) and of atmospheric pressure (P) interannual variabilities

- А – trends of mathematical expectation for annual (year) and monthly means (January I, August VIII) of T and P and dispersion trend for January ΔP_I
 В – trends of amplitudes of first harmonic of air temperature annual course $A_{1,T}$, of intramonthly temperature dispersion in August $D_{VIII,T}$, and of amplitude of first harmonics of temperature $A_{1,DT}$ and pressure $A_{1,DP}$ annual course intramonthly dispersion
 С – number (N), intensity (h) and duration τ of positive (+) and negative (-) temperature anomalies for year and for August, 1 – all anomalies, storms, 2 – large anomalies

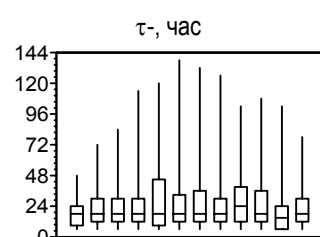
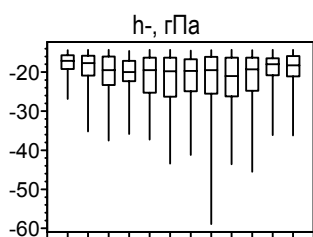
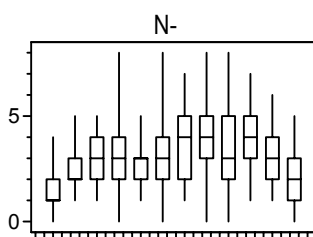
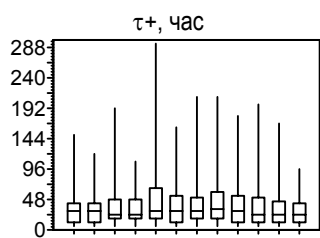
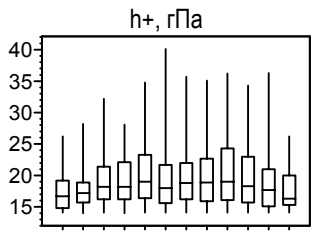
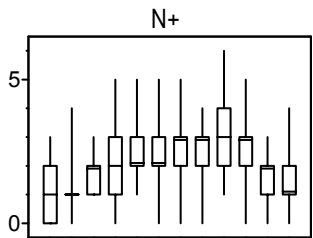




Температура – Temperature



Давление – Pressure



t, мес

Наряду с общими чертами, существуют особенности годовой ритмики и межгодовой изменчивости параметров. Годовой ход параметров D , N^+ , N^- имеет у T более правильную форму и больший размах по сравнению с P . Количество N^+ и N^- в течение всего года примерно одинаково как у T , так и у P ; различие между T и P состоит в том, что в теплый сезон $N^+_{T} > N^+_{P}$, а в холодный сезон $N^+_{P} < N^+_{T}$. В ряду температуры в теплый сезон $h^+ > h^-$, а в холодный сезон $|h^+| < |h^-|$, т.е. наложение процессов синоптического масштаба на годовой ход среднемесячных значений в целом за многолетний период усиливает межсезонные контрасты. У P в течение года $|h^+| \cong |h^-|$. Годовой ход τ^{\pm} выражен у T очень четко – в теплый сезон продолжительность штормов не превышает 1 суток, а в холодный сезон максимальная продолжительность достигает 5÷8 суток, τ^+ и τ^- соизмеримы. Для P в течение всего года характерно соотношение $\tau^+ > \tau^-$, причем $\tau^+_{T} < \tau^+_{P}$ весь год, $\tau^-_{T} < \tau^-_{P}$ только в теплый сезон, а в холодный и переходные сезоны $\tau^-_{T} \cong \tau^-_{P}$.

В таблицах 4-5 также приведены средние значения и оценки СКО и характеристик трендов параметров изменчивости процессов синоптического масштаба по месяцам и в среднем за год. Тренды внутримесячной дисперсии температуры отрицательны во все месяцы, кроме сентября, октября и декабря, с сентября по апрель их вклад в общую дисперсию ничтожно мал, значим на 95% уровне тренд только в августе, когда он объясняет 16% дисперсии. Отрицательный тренд среднегодовых значений незначим на 95% уровне и объясняет 10% дисперсии. Это многолетнее уменьшение интенсивности процессов синоптического масштаба происходит за счет соответствующего уменьшения в большинстве месяцев и, в среднем, за год как количества, так и интенсивности (а значит и продолжительности) положительных и отрицательных выбросов, которое особенно заметно в холодный сезон. Сопоставление оценок по всем аномалиям 10 % обеспеченности с оценками по аномалиям меньшей обеспеченности показывают, что эта тенденция обусловлена в первую очередь межгодовыми изменениями наиболее интенсивных "штормов". У давления тренды параметров изменчивости синоптического масштаба знакпеременные в годовом ходе, в подавляющем большинстве случаев они незначимы на 95% уровне и их вклад в дисперсию не превышает 5%.

Важной характеристикой временных рядов является оценка квантилей межгодовой изменчивости амплитуд $|a_k|$ разложения в ряд Фурье на годовых отрезках последовательности значений внутримесячной дисперсии D_j (см. табл. 5-6). Графики рядов $|a_1|$ для T и P приведены на рис. 3В. Межгодовые флуктуации $|a_k|$ велики и в рядах температуры и давления при всех k . Для T характерно преобладание в годовом ходе первой гармоники, хотя в отдельные годы вклад высших гармоник существенен. Для давления также характерно преобладание первой

Рис. 4. Вероятностные характеристики годовой ритмики и межгодовой изменчивости параметров процессов синоптического масштаба.

Параметры: D_j – дисперсия внутримесячной изменчивости, N^{\pm} – количество положительных и отрицательных выбросов, h^{\pm} – интенсивность выбросов, τ^{\pm} – продолжительность выбросов

Fig. 4. Probabilistic characteristics of annual rhythmic and interannual variability of synoptic events parameters

Parameters: D_j – intramonthly dispersion variability, N^{\pm} – number of positive and negative pulses, h^{\pm} – pulse intensity, τ^{\pm} – pulse duration

гармоники (хотя и не столь сильное, как для температуры) и значительная межгодовая изменчивость дисперсионных вкладов первой и высших гармоник. Из графиков рядов других параметров изменчивости синоптического масштаба (рис 3С) следует, что ослабление внутримесячной изменчивости вызвано снижением как количества (N), так и интенсивности (h) выбросов (в первую очередь положительных и, в меньшей степени, отрицательных).

В таблицах 6-7 и на рис. 3В приведены средние значения и оценки СКО и характеристик тренда параметров годового хода внутримесячной дисперсии D_j . Все характеристики устойчивы, поскольку коэффициент вариации $C_v = \sigma/m < 1$. Тренды амплитуд $|a_k|$ и фаз φ_k незначимы на 95% уровне, вклад тренда φ_k в общую дисперсию ничтожно мал. В связи с проблемой региональных проявлений глобального потепления отметим в ряду температуры уменьшение размаха годового хода D_j за счет отрицательных трендов $|a_1|$ и $|a_2|$. Многолетний минимум $|a_1|$ зафиксирован в 1989 г. Одновременно с понижением среднегодовых значений P (табл. 5, рис 3А) происходит усложнение формы годового хода D_j из-за отрицательного тренда $|a_1|$ и положительного тренда $|a_2|$, в результате чего тренды дисперсионных вкладов годовой и полугодовой гармоник значимы на 95% уровне.

Поскольку суточный ход, который проявляется только у температуры воздуха, объясняет менее 5% ее дисперсии и представлен данными четырехсрочных в сутки измерений, ограничимся в его описании табл. 2, 3. Согласно табл. 2 максимум регулярного суточного хода $m(t)$ приходится на дневной срок, а минимум приходится на ночной срок. Кривые суточного хода $m(t)$ и $D(t)$ находятся в противофазе, т.е. усиление изменчивости отмечается ночью и утром. Характеристики $m(t)$ имеют хорошо выраженные сезонные особенности. Летом (с декабря по февраль) размах регулярного суточного хода составляет около 1.5° , в переходные сезоны он уменьшается до $0.5 \div 1.0^\circ$, а с мая по август он ничтожно мал. Суточный ход $D(t)$, наоборот, лучше выражен в холодный сезон с мая по октябрь, когда его размах достигает 1° для среднемесячных значений и $2.5 \div 3.0^\circ$ для срочных значений. Дисперсия изменчивости в синоптическом диапазоне превышает дисперсию межгодовой изменчивости в $3 \div 5$ раз в холодный сезон и в $5 \div 8$ раз в теплый сезон. Согласно табл. 3 кривые суточного хода выборочных экстремумов $T_{\min}(t)$, $T_{\max}(t)$ и их сезонные особенности хорошо согласуются со средним многолетним суточным ходом $m(t)$, а некоторые различия в форме и фазе кривых связаны с выборочной изменчивостью оценок экстремумов и ограниченным количеством сроков измерений. Зависимость параметров тренда межгодовой изменчивости среднегодовых и среднемесячных значений температуры воздуха и давления от времени суток на станции Беллинсгаузен не выявлена.

Выполненный анализ позволяет уточнить результаты дисперсионного анализа структуры межгодовой изменчивости с учетом низкочастотной модуляции. Дисперсия междусуточной изменчивости обусловлена изменениями среднегодовых значений, годовой ритмикой и процессами синоптического масштаба. Согласно таблица 8 аддитивная составляющая межгодовой изменчивости объясняет менее 5% дисперсии среднесуточных значений.

Годовая ритмика объясняет около 60% дисперсии T и около 25% дисперсии P , причем у T регулярная ритмика превосходит по интенсивности низкочастотную модуляцию почти вдвое, а у P наоборот – модуляция почти в пять раз превосходит регулярную ритмику. Остальные 40% дисперсии T и около 75% дисперсии P приходятся на дисперсию процессов синоптического масштаба, которая и у T , и у P почти на 80% обусловлена сезонной модуляцией. Таким образом, модуляционная составляющая многократно превосходит аддитивную составляющую межгодовой изменчивости.

Таблица 8 – Table 8

Дисперсионный анализ сезонной и межгодовой изменчивости среднесуточных значений приповерхностной температуры воздуха T и атмосферного давления P

Dispersion analysis of seasonal and inter-annual variability of daily surface air temperature T and of sea level pressure P

Параметр Parameter	Среднесуточные Mean daily	AC	MC				
			Годовой ход Annual course		Синоптическая изменчивость Synoptic variability		
	D	$D_{AC}/D, \%$	$D_G/D, \%$		$D_C/D, \%$		
			$D_{GR}/D, \%$	$D_{GM}/D, \%$	D_{CP}	$D_{CR}/D, \%$	$D_{CM}/D, \%$
T	21.9 °C ²	3	59		38		
			37	22	1	32	5
P	152.5 гПа ²	2	23		75		
			4	19	2	65	8

Примечание к таблице:

D – дисперсия исходного ряда среднесуточных значений. Составляющие изменчивости: AC – аддитивная составляющая (среднегодовые значения); MC – модуляционная составляющая;
Составляющие дисперсии: D_G – годовой ход, модулированный в диапазоне межгодовой изменчивости; D_{GR} – средний многолетний годовой ход; D_{GM} – модуляция годового хода; D_C – модулированная изменчивость синоптического масштаба; D_{CP} – средняя многолетняя внутримесячная дисперсия; D_{CR} – сезонная модуляция изменчивости синоптического масштаба; D_{CM} – межгодовая модуляция изменчивости синоптического масштаба.

Comments to Table:

D – initial daily data dispersion. Variability components: AC – additive component (annual mean values); MC – modulation component;
Dispersion components: D_Y – annual course interannual variability range; D_{YM} – modulation annual course; D_{YR} – averaged regular annual course; D_M – multiyear mean intra-monthly dispersion; D_S – modulated synoptic scale variability – intramonthly dispersion; D_{SM} – seasonal modulation of synoptic variability (regular annual course D_S and its interannual modulation); D_{AM} – inter-annual modulation of synoptic scale variability–additive component of interannual variability D_S .

4. Заключение

Многолетние ряды данных срочных гидрометеорологических измерений позволяют оценивать вероятностные характеристики межгодовой изменчивости, годовой ритмики, изменчивости процессов синоптического масштаба и суточного хода. Межгодовая изменчивость представима аддитивной и модуляционной составляющими. Модели случайной величины и стационарного случайного процесса могут быть использованы для выявления общих закономерностей формирования климатической изменчивости во всем частотном диапазоне и в качестве индикаторов годовой и суточной ритмики, моделью которых является периодически коррелированный случайный процесс.

Основной вклад в дисперсию температуры воздуха и атмосферного давления в районе Антарктического полуострова вносят годовая ритмика и процессы синоптического масштаба, а модуляционная составляющая превосходит аддитивную по интенсивности.

Годовой ход приземной температуры и давления хорошо выражен как в средних многолетних значениях, так и в характеристиках межгодовой изменчивости, включая годовые экстремумы. Регулярная годовая ритмика в ряду температуры превосходит по интенсивности низкочастотную модуляцию почти вдвое, тогда как у давления модуляция почти в пять раз интенсивнее регулярной ритмики. Спектральный состав годового хода давления сложнее, чем у температуры воздуха.

Тренды среднегодовых и среднемесячных значений температуры положительны (кроме сентября и октября), в январе, феврале, августе и у среднегодовых значений они значимы на 95% уровне. Тренды среднемесячных значений давления знакопеременны и незначимы (кроме января) на 95% уровне. Отрицательный тренд среднегодовых значений статистически значим, понижение давления сопровождается усилением межгодовых флуктуаций. Годовой размах тренда среднемесячных значений температуры и давления превосходит по абсолютной величине тренд среднегодовых значений.

Для описания роли процессов синоптического масштаба важен учет внутримесячной дисперсии и характеристик (количество, интенсивность и продолжительность) синоптических флуктуаций. Источником изменчивости синоптического масштаба является динамика (зарождение, перемещение, трансформация и исчезновение) атмосферных вихрей (Лагун и Язев 1994). Важнейшей особенностью является годовой ход, проявляющийся в интенсификации и в усилении межгодовой изменчивости в зимний сезон за счет увеличения как количества возмущений, так и их интенсивности и продолжительности, что указывает на то, что многолетние тренды основных климатических параметров формируются в значительной степени в синоптическом диапазоне.

Литература

- Боков В.Н., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А., 1993, Оценки межгодовой изменчивости скорости ветра над морем. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 29: 253–289.
- 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.
- Дрейпер Н., Смит Г., 1986, Прикладной регрессионный анализ. Финансы и статистика. Москва: 366 с.
- IPCC Third Assessment Report – Climate Change. 2001, <http://www.ipcc.ch>
- Иванов Н.Е., Рожков В.А., 1996, Компонентное описание ритмики гидрометеорологических процессов. Известия СПб ГУ. 2(14): 66–74.
- Jagovkina S.V., Lagun V.E., 2004, Climatology of Antarctic upper-air parameters 2004. Polish Polar Studies. Gdynia: 131–142.
- Kejna M., 2003, Trends of air temperature of the Antarctic during the period 1958-2000. 2003. Polish Polar Research, 24: 99–126.
- Kejna M., Lagun V., 2004, Comparison of the climate of the stations Arctowski and Bellingshausen (King George Island, South Shetland Islands) in the years 1977-1999. Polish Polar Studies, Gdynia: 149–166.
- Lagun V.E., 2001, Antarctic Peninsula warming: analysis of Bellingshausen station data / 8th Scientific Assembly of International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS) Innsbruck. July 10-18, 2001, Austria: 24.
- Лагун В.Е., 2003, Климатическая изменчивость атмосферы Южной полярной области в двадцатом столетии. Всемирная конференция по климату (WCCC 2003). Москва 29 сентября – 3 октября 2003 г. Тезисы докладов. Москва: 416 с.
- Лагун В.Е., Язев А.И., 1994, Глобальное распределение и временная изменчивость параметров циклонических синоптических возмущений в атмосфере. Доклады РАН. 336(4): 356–361.
- Marshall G.J., Lagun V.E., Lachlan-Cope T.A., 2002, Changes in Antarctic Peninsula tropospheric temperatures from 1956-99: a synthesis of observations and reanalysis data. International Journal of Climatology. 22: 291–310.
- Рожков В.А., Лопатухин Л.И., Лавренов И.В., Дымов В.И., Бухановский А.В., 2000, Моделирование штормового волнения. Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 36: 689–699.

Тьюки Дж., 1981, Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ. Мир. Москва: 693 с.

Turner J., Colwell S.R., Marshall J., Lachlan-Cope T., Carleton A.M., Jones P.D., Lagun V.E., Reid P.A., Jagovkina 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., Jagovkina S. Antarctic climate change during the last 50 years. 2005. *International Journal of Climatology*, 25 (3): 279–294.

W sprawie wzrostu temperatury powietrza (ocieplenia) w rejonie Półwyspu Antarktycznego

Streszczenie

Najbardziej wyraźne przejawy tak zwanego "globalnego ocieplenia" na Półkuli Południowej zarejestrowano w rejonie Półwyspu Antarktycznego; dotyczy to zarówno ocieplenia przy powierzchniowej warstwy jak i swobodnej atmosfery. Badania ilościowe mechanizmów kształtowania się znacznej zmienności klimatycznej na tym obszarze wymagają znajomości charakterystyk statystycznych struktury najważniejszych elementów meteorologicznych. Takie badania stały się możliwe dzięki stworzeniu w Instytucie Naukowo-Badawczym Arktyki i Antarktyki (AANII) bazy danych o klimacie południowych obszarów polarnych w ramach opracowywanego systemu geoinformatycznego "ANTARKTYKA" i międzynarodowego projektu SCAR READER.

Zadaniem tej pracy jest przedstawienie uściślonych metod opisu statystycznego zmienności czasowej temperatury powietrza i ciśnienia atmosferycznego oraz oceny probabilistycznych charakterystyk ich reżimu w skalach zmienności wahań od międzyrocznych do wewnątrzdobowych z uwzględnieniem modulacji, na podstawie danych obserwacji przyziemnych w rejonie Półwyspu Antarktycznego.

Danymi wyjściowymi są pełne szeregi obserwacji temperatury powietrza i ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza wykonywane na rosyjskiej stacji subantarktycznej Bellingshausen cztery razy na dobę (lata 1969–2002). Dane te przeszły pełną ilościową kontrolę jakości oraz testy jednorodności szeregów czasowych. Pomiarów meteorologicznych na stacji Bellingshausen, znajdującej się na Wyspie Króla Jerzego (King George – Waterloo) w archipelagu Szetlandów Południowych, rozpoczęły się 22 lutego 1968 roku i są, bez przerw, wykonywane na tej samej powierzchni.

Wieloletnie szeregi czasowe pomiarów terminowych elementów hydrometeorologicznych pozwalają na analizę zmienności międzyrocznej, rytmikę roczną, zmienność wewnątrzsezonową, przebieg procesów skali synoptycznej i przebiegi dobowe. Podskalowa analiza probabilistyczna uwzględnia efekty wpływu modulacji niskoczęstotliwościowej, przejawiającej się w wieloletnich zmianach charakterystyk rytmu rocznego, a także w sezonowej i międzyrocznej zmienności procesów przebiegu synoptycznego i dobowego. Taką modulację o niskiej częstotliwości traktuje się jako składową modulacyjną zmienności międzyrocznej w odróżnieniu od składowej addytywnej¹, przedstawianej przez szereg wartości średnich rocznych.

Podstawowy wkład w sumaryczną dyspersję temperatury powietrza i ciśnienia atmosferycznego wnoszą rytmika roczna i procesy skali synoptycznej, przy czym jeśli dla temperatury wewnątrzroczna zmienność objaśnia ponad 50% dyspersji, to dla ciśnienia – mniej niż 20%. Wkład zmienności wartości średnich rocznych w sumaryczną dyspersję szeregów stanowi mniej niż 5%. W ten sposób składowa modulacyjna przewyższa intensywność składowej addytywnej.

¹ Addytywny – będący wynikiem sumowania składników, sumą ich treści.

Trend zmienności międzyrocznej stanowi wielomian wyższego stopnia, uwzględniający komponenty liniowy i paraboliczny. Najważniejszą właściwością składowej addytywnej jest trend liniowy wartości oczekiwanej (dodatni i istotny na poziomie ufności 95% dla temperatury powietrza, ujemny i nieistotny (poziom ufności < 95%) dla ciśnienia atmosferycznego), objaśniający 10–15% dyspersji wartości średnich rocznych. Szeregi czasowe anomalii wartości średnich rocznych w stosunku do trendu wartości oczekiwanych są niestacjonarne pod względem ich dyspersji, ale wkład wielomianowego trendu oczekiwania matematycznego tych anomalii jest niewielki – wyjaśnia on nieco ponad 10% dyspersji względem wartości oczekiwanej dla ciśnienia i mniej niż 5% dla temperatury. Obniżanie się tła ciśnienia atmosferycznego stowarzyszone jest ze wzrostem amplitudy zmienności międzyrocznej, co w części może być wyjaśnione jako efekt lokalnego wzrostu aktywności cyklonalnej. Dla opisu procesów skali synoptycznej wykorzystuje się dyspersję wewnątrzmięsięczną i charakterystyki (ilość, intensywność i czas trwania) fluktuacji synoptycznych. Najważniejszą cechą jest przebieg roczny, w którym przejawia się intensyfikacja i nasilenie międzyrocznej zmienności procesów synoptycznych w sezonie zimowym, kosztem wzrostu zarówno amplitudy i ilości zaburzeń, jak i ich intensywności i czasu trwania. Trendy wieloletnie formują się w znacznym stopniu pod wpływem działania procesów skali synoptycznej. Źródłem zmienności skali synoptycznej jest dynamika (tworzenie się, przemieszczanie, transformacja i wypełnianie się) wirów atmosferycznych.

Przeprowadzona analiza statystyczna szeregów terminowych obserwacji meteorologicznych na stacji Bellingshausen pozwoliła na ilościową ocenę wkładu procesów o różnej skali czasowej w formowanie zmienności obserwowanego w rejonie Półwyspu Antarktycznego reżimu klimatycznego przyziemnej warstwy atmosfery. Otrzymane oceny wykazują na ile zmienia się wartość dyspersji temperatury powietrza i ciśnienia atmosferycznego przy wykorzystaniu danych z różnych skal uśrednienia w czasie. Tym samym wyjaśniają, jaki odsetek zmienności temperatury i ciśnienia jest tracony w analizach wykorzystujących różne okresy uśrednienia.

Summary

Sign of the so-called "global warming" in the Southern Hemisphere is most clearly revealed in the vicinity of the Antarctic Peninsula in the surface layer as well as in the free atmosphere. A quantitative study of the mechanisms of the climatic variability formation in the Antarctic requires an evidence of the statistical structure of the meteorological parameters fields. Such study has become possible due to creating a database on climate of Southern polar area in the framework of the geo-information system "The Antarctic" developed at the Arctic and Antarctic Research Institute and of International SCAR READER Project.

The goal of this work is to define more precisely the method of the statistical analysis of time-series of surface air temperature and air pressure at sea level in Antarctic Peninsula region. This method is applied for determining of the probabilistic variability characteristics based on standard observations over the range from interannual to diurnal changes taking into account the low frequency modulation.

The input data are uniform six-hourly time-series of surface air temperature and sea level pressure obtained at Bellingshausen station over the period 1969–2002 and processed by numerical data quality control and homogeneity testing. Meteorological observations at Bellingshausen station, located at King George (Waterloo) Island, Southern Shetlands archipelago, are provided since February, 22, 1968 without moving of observational place.

Multiyear time-series of current hydrometeorological observations allow provide the analysis of interannual variability, annual rhythmic, intra-seasonal variations, synoptic scale processes and diurnal course. The results of by-range probabilistic analysis take into account the modulation of annual variations over the range of interannual variability and interannual and seasonal variations of synoptic scale variability. The interannual variability contains an additive and modulation components. The additive component is represented by a sequence of annual averages while the modulation component is manifested through the interannual variability of parameters of the annual variations and in the interannual variations of the synoptic variability characteristics.

Both synoptic and annual variability make the main contribution to the total dispersion, while for temperature, the variability within a year accounts for more than 50% of dispersion, for pressure it is less than 20%. The contribution of the variability of annual averages to the total dispersion comprises less than 5%. However, the interannual variability consists not only of the changes of annual averages. The contribution of daily variations and of the variability within a day to the total dispersion is also small comprising both for air temperature and for pressure less than 10% of total dispersion. Thus modulation component exceeds additive component by intensity.

The interannual variability trend is represented by a power polynomial that takes into account the linear and parabolic components. The most important feature of the additive component is a linear trend of mathematical expectation (positive and significant at a 95% level for temperature and negative and insignificant at a 95% level for pressure) accounting for about 10-15% of dispersion of the annual averages. The time series of annual averages anomalies relative to the mathematical expectation trend are non-stationary in dispersion, but the contribution of the polynomial trend of mathematical expectation of these anomalies is small accounting for slightly more than 10 % of dispersion relative to the mathematical expectation of pressure and less than 5 % for temperature. The decrease of the background atmospheric pressure is accompanied by the increase in the amplitude of interannual oscillations, which can be partly attributed to a local increase of cyclonic activity. For description of synoptic scale processes the intra-monthly dispersion and synoptic fluctuations characteristics (number, intensity and duration) are used.

Annual course analysis demonstrates intensification and forcing of interannual variability in winter season due to increasing both number and intensity and duration of fluctuations. This is important feature of climate variability formation.

Multiyear trends are formed in synoptic diapason mostly. Synoptic variability sources are atmospheric eddies dynamics (genesis, moving, transformation and disappearance).

The trends of surface temperature and pressure at sea level have a different sign: the temperature time-series contain a positive linear trend while the pressure time-series contain a negative linear trend, which account approximately for 10–15% of dispersion of annual averages. The linear pressure trend is insignificant at a 95% level while the linear temperature trend is statistically significant.

The statistical analysis of meteorological observations data at standard synoptic hours obtained at Bellingshausen station allowed to determine quantitatively the contribution of different time scale processes into formation of observed changes of climatic regime parameters of the surface atmospheric layer in the vicinity of the Antarctic Peninsula. The obtained estimates show in particular, how much is the dispersion of temperature and pressure changes (what part of variability is lost) when using data with different averaging scales.