

## ОСОБЕННОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЕ В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЯ

*В работе содержатся результаты исследований статистической структуры полей температуры воздуха в средней тропосфере в западном секторе Южного полушария. Приведены особенности временной изменчивости температуры воздуха в атмосфере. Произведена попытка выявить реакцию на поля температуры процессов Эль-Ниньо-Южное колебание. Исследования проводятся с помощью методов многомерного статистического анализа и теории случайных процессов.*

**Ключевые слова:** собственный вектор, главная компонента, спектральная плотность, скрытая периодичность, поле.

**Вступление.** В 60-70 годы прошлого столетия был опубликован ряд работ, в которых показано, что существует статистически значимая телеконнекция между атмосферными процессами в тропической зоне Тихого океана и внетропических широтах Южного полушария. Эта телеконнекция обусловлена влиянием явления Эль-Ниньо-Южное колебание (ENSO), которое периодически наблюдается в тропической зоне Южного Тихого океана. В своих работах Ван Лун и Шеа [1] указывают на изменения приземного атмосферного давления в годовом цикле над средними и высокими широтами Южного полушария, которые происходят между годом теплых события (Эль-Ниньо) и предыдущим годом. Эти результаты подтвердились в работе Мо и Уайта [2] для периода 1972-1980 гг. Они обнаружили значительную телеконнекцию между месячными аномалиями геопотенциальной высот поверхности 500 гПа в течение летнего сезона и индексом Южного колебания (SOI). Подтвердилось наличие связи между ENSO и временной эволюцией аномалий приземного атмосферного давления над Южным океаном и регионами антарктического побережья [3]. Также были определены трассы, вдоль которых осуществляются указанные взаимодействия, причем 30% вариаций давления в непосредственной близости от Антарктиды имели временной масштаб, свойственный ENSO, а именно 3-4 года. Указанные исследования подтверждают факт передачи сигнала ENSO в зоны высоких широт Южного полушария.

Однако теоретические аспекты взаимодействий явления ENSO с атмосферными процессами не были обоснованы. Только в 1981 года Хоскинс и Кэроли [4] в своих теоретических исследованиях показали, что зона глубокой конвекции, которая часто формируется вблизи экватора, может действовать как генератор волн Россби путем образования завихореностей за счет адиабатического нагрева. Эти волны Россби перемещаются в направлении полюсов обоих полушарий и являются причиной телеконнекций между ENSO и атмосферными процессами, формирующими климат обоих полушарий.

Как показал Кэроли [5], перемещение волн имело место в атмосфере Тихого океана в течение зимы Южного полушария в «теплые» события (Эль-Ниньо) от тропической зоны в направлении средних и высоких широт. Указанный процесс называют Тихоокеанской-южноамериканской телеконнекцией. При ее развитии перемещения волн Россби приводит к интенсификации процессов синоптического масштаба в южной части Южной Америки, прилегающих акваториях Южного океана и над Антарктическим полуостровом.

Предполагается, что океаническая циркуляция может играть роль в передаче сигнала ENSO в высокие широты Южного полушария через антарктическую циркумполярную волну [6], которая формируется в температуре поверхностных вод в

западной части субтропической зоны Тихого океана и затем распространяется на юг и восток в Южный океан, где вливается в Круговое Антарктическое течение. Параллельно с аномалиями температуры поверхности океана перемещаются на юг и юго-восток аномалии среднего давления. Уайт и Петерсон [6] построили схему этого процесса. Ими был установлен источник теплой океанической воды в районе западной субтропической части Тихого океана, от которого происходит распространение внутритропических аномалий температуры поверхности океана.

В рассмотренных выше работах обращалось внимание, главным образом, на воздействие ENSO на температуру поверхностных океанических вод и приземную температуру воздуха, на развитие циркуляционных процессов в региональном и глобальном масштабах. Однако практически отсутствуют исследования, посвященные взаимосвязи фаз явления ENSO с температурным режимом в свободной атмосфере. В связи с этим передо мной встала задача исследовать влияние явления Эль-Ниньо на поля температуры в средней тропосфере.

**Исходные данные и методы исследования.** В качестве исходной информации были использованы данные ре-анализа ERA-40 о среднемесячной температуре воздуха на изобарической поверхности АТ-500 в узлах регулярной сетки точек  $2,5 \times 2,5^\circ$  за период 1958-2002 гг. Исследуемым является западный сектор Южного полушария, ограниченный по долготе нулевым меридианом и  $120^\circ$  з.д., а по широте от экватора до  $80^\circ$  ю.ш. В рассматриваемый сектор также входит украинская антарктическая станция «академик Вернадский».

В качестве аппарата исследований использовался алгоритм многомерного статистического анализа: корреляционный и компонентный анализ.

Известно, что поля метеорологических величин формируются под действием атмосферных процессов разных масштабов: процессов макромасштаба, синоптического масштаба, мезомасштаба и процессов еще более мелкого масштаба. В итоге метеорологическая информация приобретает шумовую компоненту, обусловленную мелкомасштабными флуктуациями, погрешностями измерений и первоначальной обработкой результатов наблюдений. Часто появляется необходимость, в зависимости от характера задачи, сосредоточить внимание на процессах крупных масштабов и не учитывать составляющие, которые обусловлены влиянием процессов мелкого масштаба. Для решения таких задач применяется компонентный анализ. Он заключается в том, что производится параметризация состава влияющих факторов, то есть в модели используются новые переменные, являющиеся линейными комбинациями исходных данных. Новые переменные должны быть, во-первых, ортогональными, во-вторых, такими, чтобы при возможно меньшем их количестве учитывалась значимая часть изменчивости исходных факторов.

Основное уравнение полной проблемы собственных значений [7] имеет вид

$$K_x W_i = \lambda_i W_i, \quad (1)$$

где  $K_x$  – матрица ковариаций исходных характеристик;  $\lambda_i$  – собственные значения матрицы ковариаций;  $W_i$  – соответствующие им собственные векторы.

Собственные векторы являются ортонормированными, то есть

$$W_i' \cdot W_i = \delta_{ij}, \quad (2)$$

где  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Исходя из этого, матрица собственных векторов является ортогональной и может служить базисом  $n$ -мерного евклидова пространства.

В этом ортогональном базисе  $W$  проводилось разложение  $m$ -мерной матрицы центрированных метеорологических полей  $\Delta X$  с помощью преобразования [8]

$$W' \Delta X = Z, \quad (3)$$

где  $Z = \{Z_{ij}\}_{n \times m}$  – матрица ортогональных компонент поля  $\Delta X$  в базисе  $W$ .

Собственные значения  $\lambda_i (i = \overline{1, n})$  являются дисперсиями  $\sigma_{z_j}^2$  ортогональных компонент исследуемых полей. Как известно  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_n$ . Тогда дисперсии главных компонент удовлетворяют неравенству  $\sigma_{z_1}^2 > \sigma_{z_2}^2 > \sigma_{z_3}^2 > \dots > \sigma_{z_n}^2$ , причем с увеличением номера  $i$  ортогональной компоненты  $Z_i$  значение дисперсий этих компонент быстро уменьшается. Поэтому равенство

$$\eta = \frac{\sum_{j=1}^k \lambda_j}{\sum_{i=1}^n \sigma_{x_j}^2} \quad (k = 1, 2, 3 \dots) \quad (4)$$

позволяет определить те ортогональные компоненты, которые дают наибольший вклад в суммарную дисперсию полей, расположенную в знаменателе уравнения (5). Эти ортогональные компоненты метеорологических полей называются главными компонентами.

**Результаты исследований и их анализ.** С помощью равенства (4) было установлено, что 70% суммарной дисперсии исследуемых полей в рассматриваемом секторе Южного полушария охватывают дисперсии первых трех ортогональных компонент этих полей, то есть именно эти главные компоненты характеризуют наиболее крупномасштабные процессы. На рис. 1 представлен помесичный вклад дисперсий каждой из трех главных компонент температуры в общую дисперсию на изобарической поверхности АТ-500.

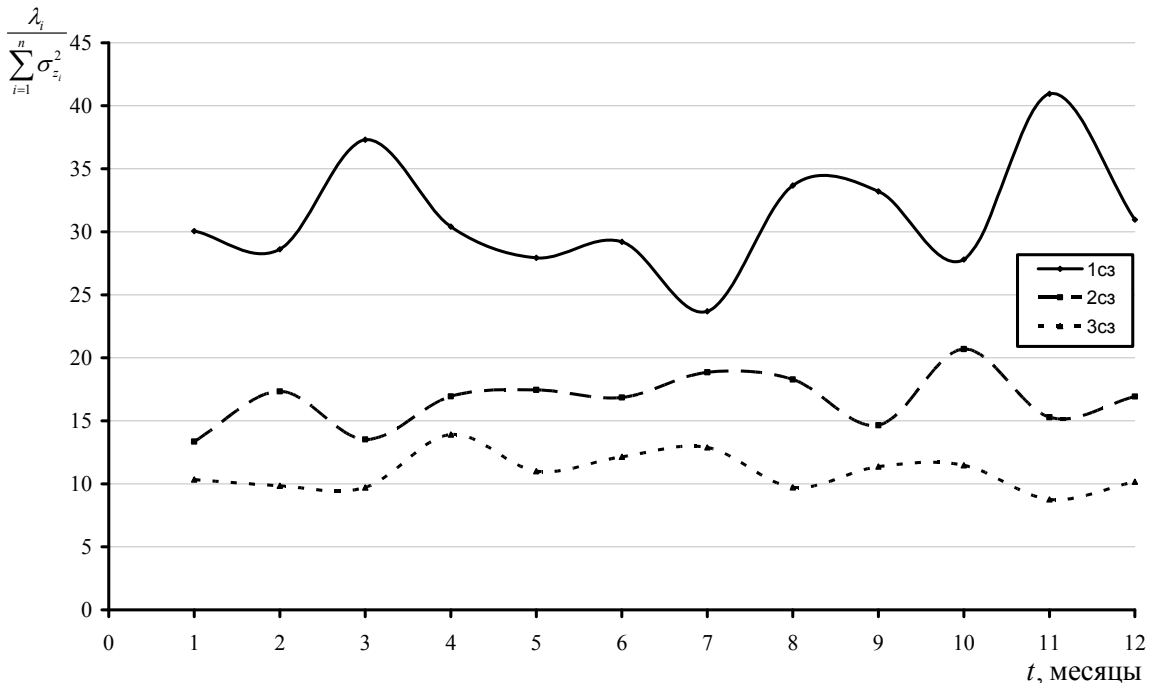


Рис. 1 – Процент охвата суммарной дисперсии первыми тремя собственными значениями (сз) температуры воздуха на АТ-500 в западном секторе Южного полушария

Видно, что изменения собственных значений имеют колебательный характер. В особенности это присуще первому собственному значению  $\lambda_1$ : максимумы наблюдаются в марте, июне, августе и ноябре, а минимумы в феврале, мае, июле и октябре. Максимумам первого собственного значения соответствуют минимумы второго и третьего собственного значения, и наоборот.

Поля собственных векторов (рис. 2) характеризуются специфическими свойствами, особенно это касается первого собственного вектора, когда дисперсии первых главных компонент имеют частные максимумы, например, в марте и ноябре.

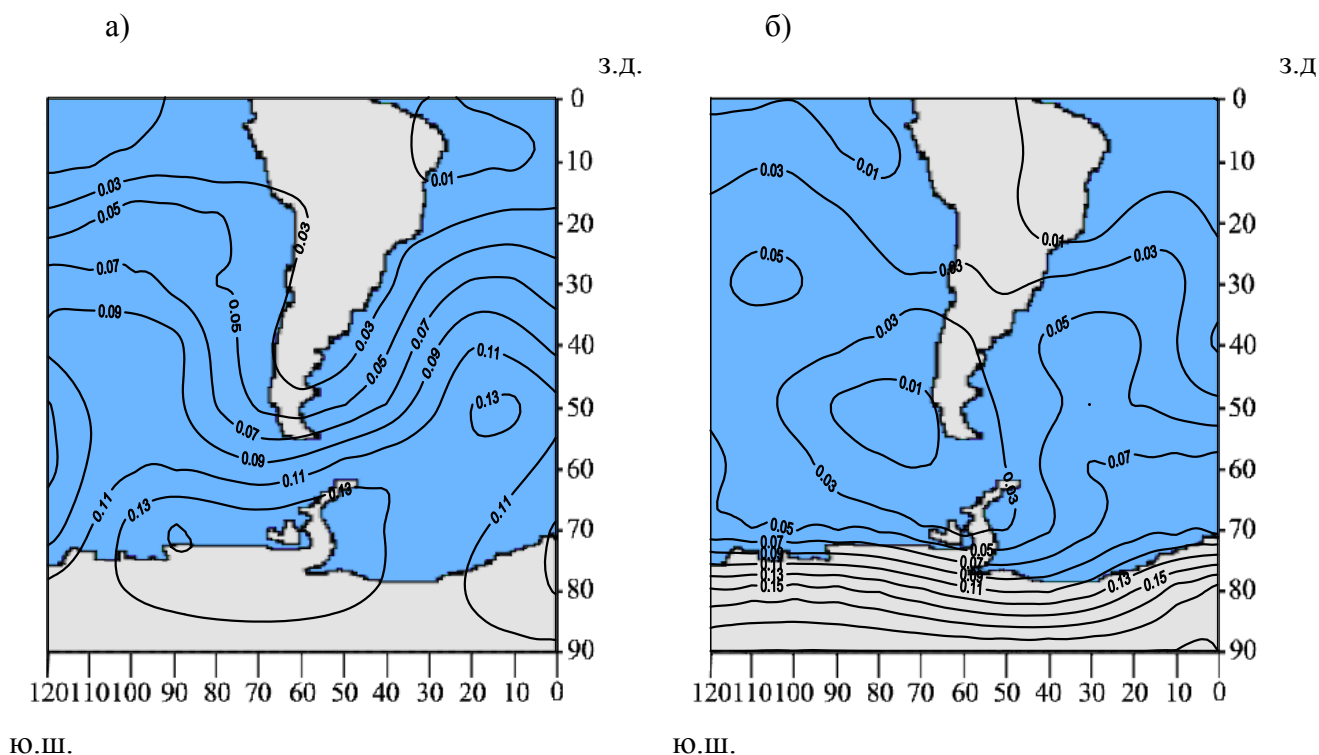


Рис. 2 – Поля первого собственного вектора температуры воздуха а) март, б) ноябрь

Из рис. 2 следует, что осенью крупномасштабные особенности полей температур формируются под значительным влиянием Южно-Американского континента, в то время как весной влияние континента на структуру полей температуры незначительно. Основное влияние в это время оказывает циклоническая деятельность, которая проявляется в поле первого собственного вектора структурой в виде диполя над Южным Тихим и Южным Атлантическим океанами.

Дипольная структура, обусловленная интенсивной циклонической деятельностью, более ярко выражена в высоких широтах Южного полушария в полях вторых и третьих собственных векторов. Это хорошо согласуется с выделяющимися максимумом и минимумом дисперсий соответственно второй и третьей главных компонент полей температуры в ноябре (рис.1).

При ортогональном преобразовании (3) полей температуры в базисе собственных векторов, образуются ортогональные компоненты полей температуры. Как показано выше, главными являются первые три ортогональные компоненты. Каждая из строк матрицы  $Z$  представляет собой статистическую совокупность соответствующей главной компоненты.

В качестве примера на рис. 3 представлен статистический ряд первой главной компоненты. Из рисунка видно, что временные ряды являются совокупностью случайных компонент и периодических колебаний. Для выявления особенностей рядов главных компонент необходимо более детальное их исследование. Для этого было произведено выявление скрытых периодичностей.

Для функции  $Z(t)$ , определенной на интервале  $[-\tau, \tau]$  и имеющей конечное число точек разрыва первого рода, справедливым является преобразование Фурье [9]

$$F_{\tau}(i\omega) = \frac{1}{\tau} \int_{-\tau}^{\tau} \frac{\sin \frac{\pi t}{2\tau}}{\frac{2t}{\tau}} Z(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (5)$$

где

$\omega$  – частота,

$$g(t) = \frac{\sin \frac{\pi t}{2\tau}}{\frac{2t}{\tau}}, \quad (6)$$

сглаживающее окно Гиббса.

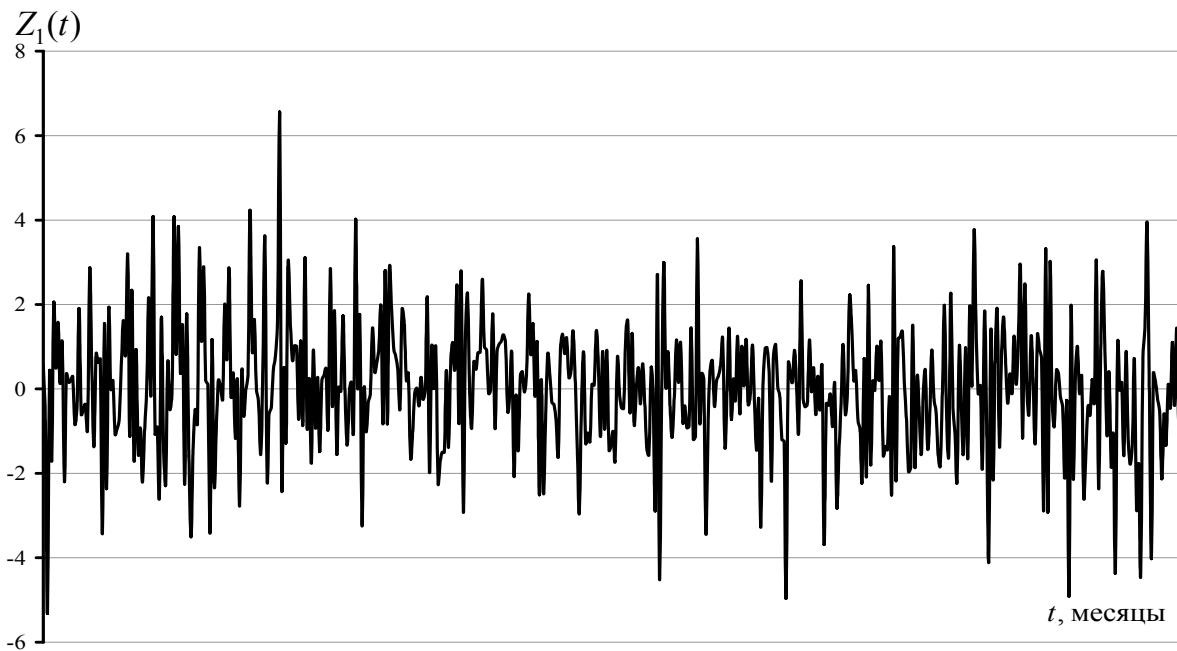


Рис. 3 – Временной ряд первой главной компоненты полей температуры воздуха

С другой стороны функцию  $Z(t)$  можно представить в виде суперпозиций простых гармоник [10]

$$Z(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (7)$$

где

$A_k$  – амплитуда  $k$ -той гармоники,  $\omega_k$  – ее частота,  $\varphi_k$  – начальная фаза.

Результаты расчетов позволили получить амплитудно-частотные характеристики  $A(\omega_k)$  для каждого из процессов  $Z_i(t)$  ( $i=1,2,3$ ). В качестве примера на рис. 4 представлена амплитудно-частотная характеристика первой главной компоненты.

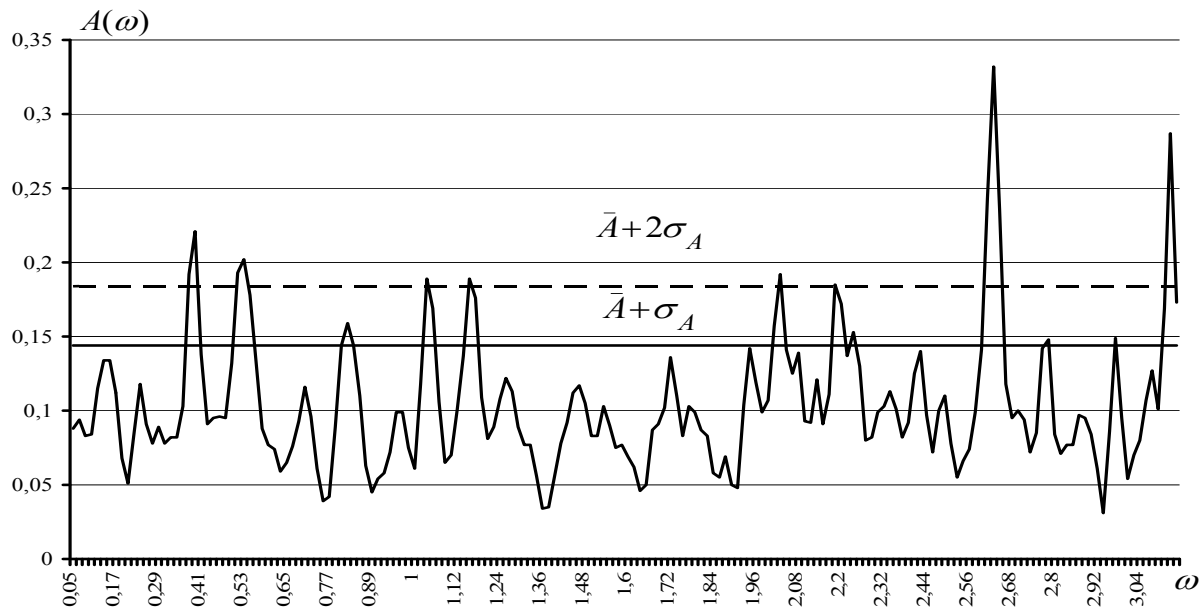


Рис. 4 – Амплитудно-частотная характеристика первой главной компоненты температуры воздуха на АТ-500

При этом, с вероятностью  $p = 0,68$  считались значимыми периодичности с частотой  $\omega_k$ , амплитуды для которых выходят за уровень  $\bar{A} + \sigma_A$ , где  $\bar{A}$  – среднее значение амплитуд периодических колебаний, а  $\sigma_A$  – их среднеквадратическое отклонение. Периоды  $T_i$ , амплитуды  $A_i$  и частоты  $\omega_i$  для каждого значимого колебания представлены в табл. 1.

В первой и второй главных компонентах проявляются 14-16-летние периодичности, а во всех трех главных компонентах колебания с периодом около 10 лет, а также с периодами 3-5 лет. Известно [11], что как квазидесятилетние, так и более короткие периодичности присущи ENSO.

Для выявления более детальных особенностей временных рядов главных компонент были рассчитаны их энергетические спектры

$$S_z(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau. \quad (8)$$

Расчеты спектральных плотностей осуществлялись с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье.

На рис. 5 представлены спектральные плотности первой и второй главных компонент соответственно.

Доверительная граница на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  определялась по соотношению (9) и показана на рис. 5-6 пунктирной линией

$$I_\alpha[S_x(0)] = \bar{S}_x(\omega) \frac{\chi^2(\alpha, \nu)}{\nu}, \quad (9)$$

где  $\bar{S}_x(\omega)$  – средний уровень спектральной плотности,  $\nu = \frac{2N - 0.5\tau_{\max}}{\tau_{\max}}$  – число

степеней свободы,  $\chi^2(\alpha, \nu)$  – критическое значение  $\chi^2$  при уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы  $\nu$ .

Периодические составляющие, которые определяются на энергетических спектрах температуры воздуха имеют интересные особенности. Как видно из рисунков, первая и вторая главные компоненты с вероятностью  $p = 0,95$  имеют значимые максимумы на временных интервалах 4, 7, 15, 18 и 20 лет, что с учетом точности расчетов соответствует периодичностям, выявленным с помощью интегрального преобразования Фурье.

Таблица 1 – Скрытые периодичности во временных рядах главных компонент полей температуры воздуха

k	$\omega_i$ , месяц <sup>-1</sup>	$T_i$ , год	$A_i$ , е.д.
Первая главная компонента			
22	0,388	16,178	0,221
30	0,525	11,962	0,202
47	0,816	7,699	0,159
60	1,039	6,05	0,189
67	1,158	5,424	0,189
118	2,031	3,094	0,192
Вторая главная компонента			
26	0,457	13,754	0,139
29	0,508	12,365	0,142
37	0,645	9,741	0,14
59	1,021	6,151	0,307
74	1,278	4,916	0,156
90	1,552	4,049	0,143
97	1,672	3,759	0,173
125	2,151	2,921	0,144
Третья главная компонента			
31	0,542	11,585	0,25
38	0,662	9,489	0,159
61	1,056	5,952	0,192
65	1,124	5,589	0,163
74	1,278	4,916	0,174
84	1,449	4,336	0,152
92	1,586	3,961	0,157
95	1,637	3,837	0,161
109	1,877	3,348	0,187
120	2,065	3,042	0,165

Данные характеристики, как утверждается в работах [11] присущи образованию «теплых» и «холодных» явлений Эль-Ниньо.

С учетом полученных периодичностей, произведено сглаживание временных рядов главных компонент методом скользящего осреднения с целью определения

содержащихся в них трендовых компонент. В качестве периода осреднения взято 4 года, которые соответствуют периодичностям, выявленным в энергетических спектрах. В сглаженном временном ряду проявляются, кроме трендов, колебания с периодом, равным выбранному исследователем периодом сглаживания, если они имеют место, и периодичности с большим периодом, а более мелкие колебания отфильтровываются. От выбранного периода сглаживания зависят фильтрующие качества оператора сглаживания, то есть чем меньше период сглаживания, тем большей является реакция фильтра, но тем хуже его фильтрующие качества и на оборот.

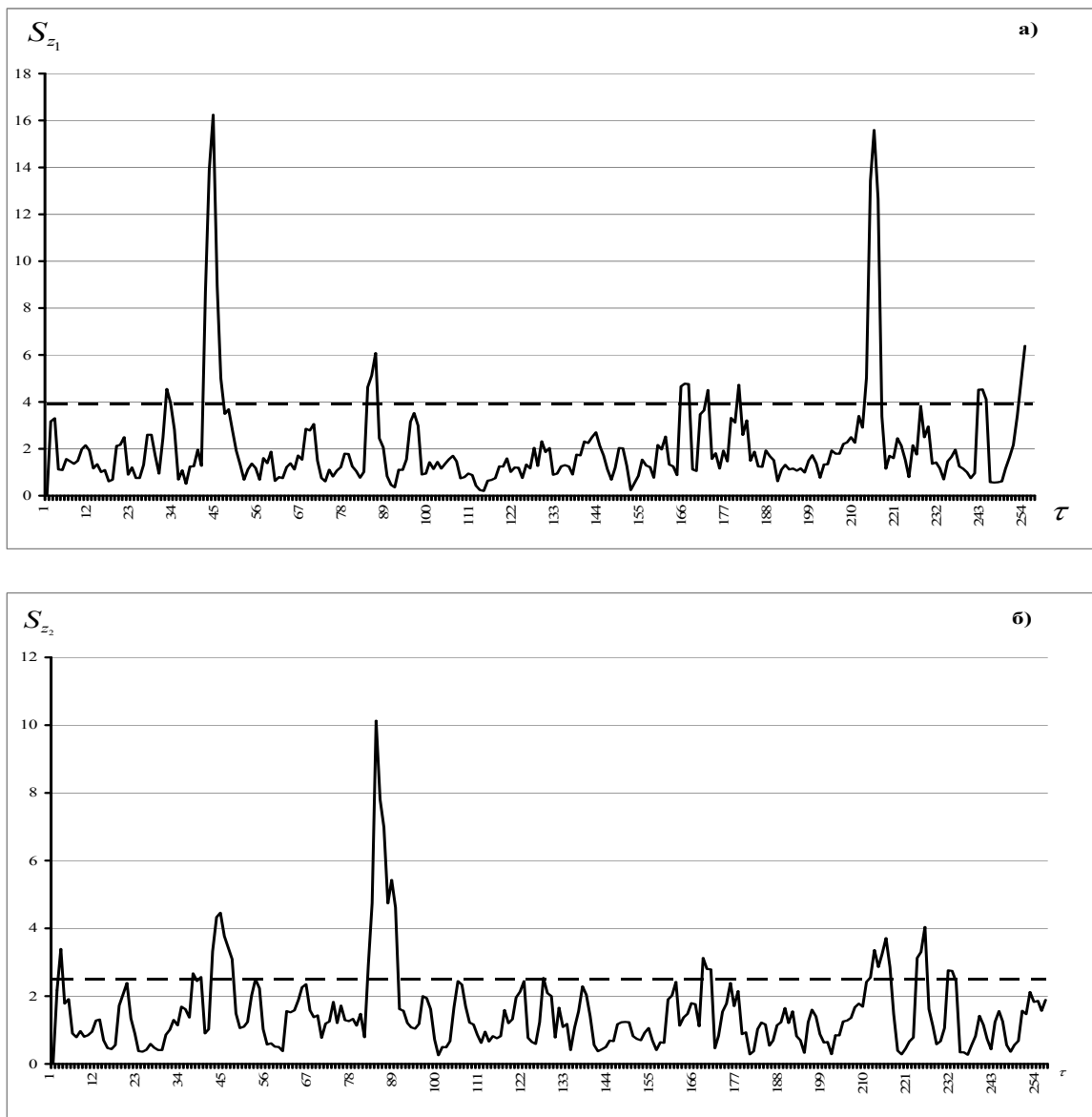


Рис. 5 – Спектральная плотность первой (а) и второй (б) главных компонент

Оператор скользящего осреднения имеет вид

$$\hat{z}(t_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=k-\frac{n}{2}}^{k+\frac{n}{2}} \alpha_i z_i, \quad (10)$$

где  $n$  – интервал сглаживания,  $k$  – середина отрезка сглаживания,  $\alpha_i$  – весовой множитель  $i$ -той точки.



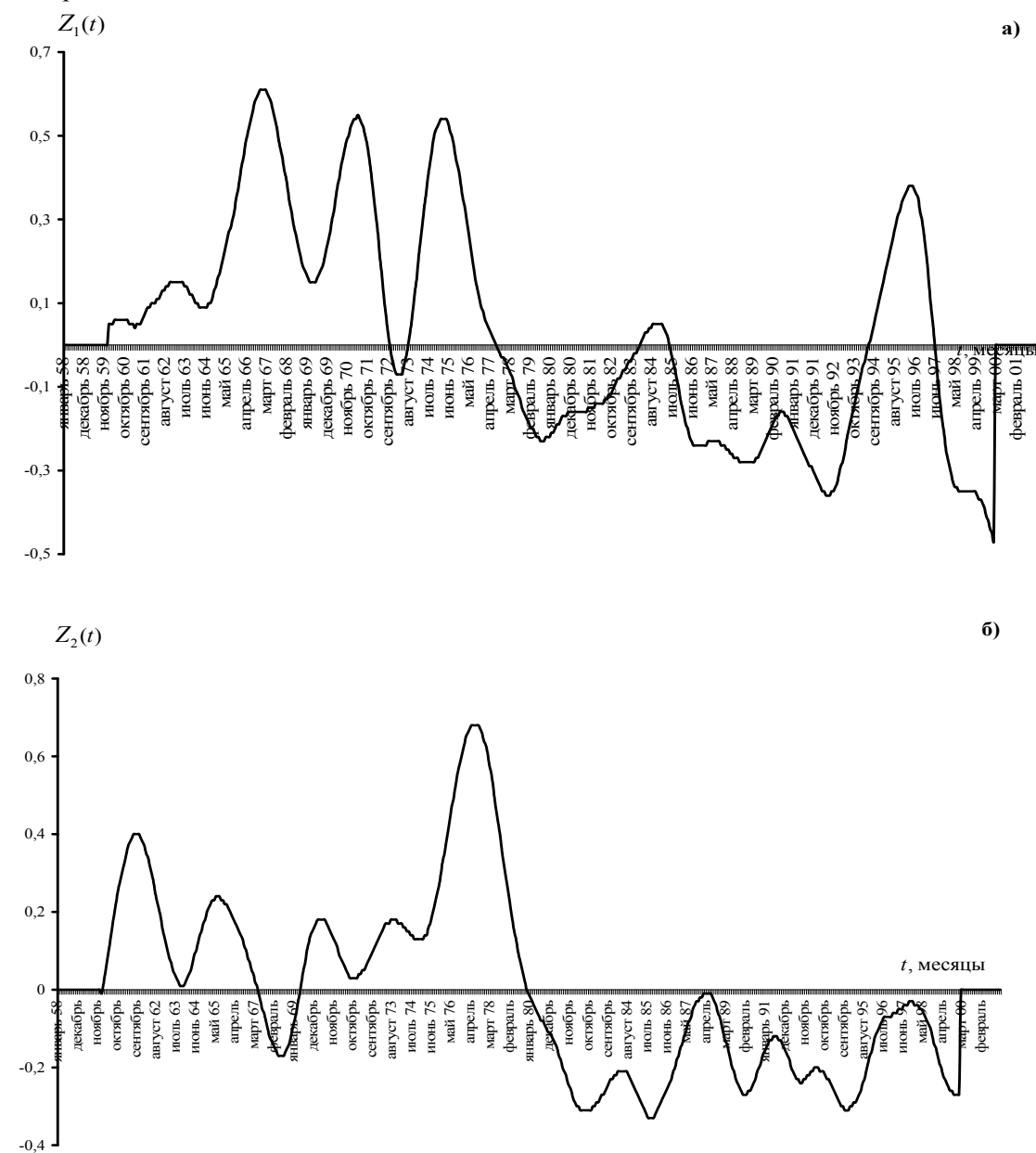
В качестве весового множителя использовалась функция [7]

$$\alpha_i = 1 + \cos \frac{2\pi(i-k)}{n}. \quad (11)$$

Сглаженные временные ряды первой, второй и третьей главных компонент представлены на рис. 6.

У первой главной компоненты в период до 1977 года наблюдаются значительные по амплитуде колебания с временным интервалом 4-5 лет. После 1977 года общий фон значений температуры в западном секторе Южного полушария начал снижаться. Кроме того возникают колебания с незначительной амплитудой с периодом 10 лет.

Похожий характер имеет и вторая главная компонента. Это можно объяснить тем, что вклад в общую дисперсию полей температуры второй главной компоненты не очень отличается от вклада первой главной компоненты, то есть она в также значительной степени отражает влияние на формирование полей температуры крупномасштабных процессов. Но есть и разница в структуре этих сглаженных рядов. Дело в том, что в сглаженном ряде второй главной компоненты более отчетливо проявляются колебания с периодом 4-5 лет, которые обуславливаются влиянием на поля температуры процессов меньшего масштаба, о которых шла речь выше.



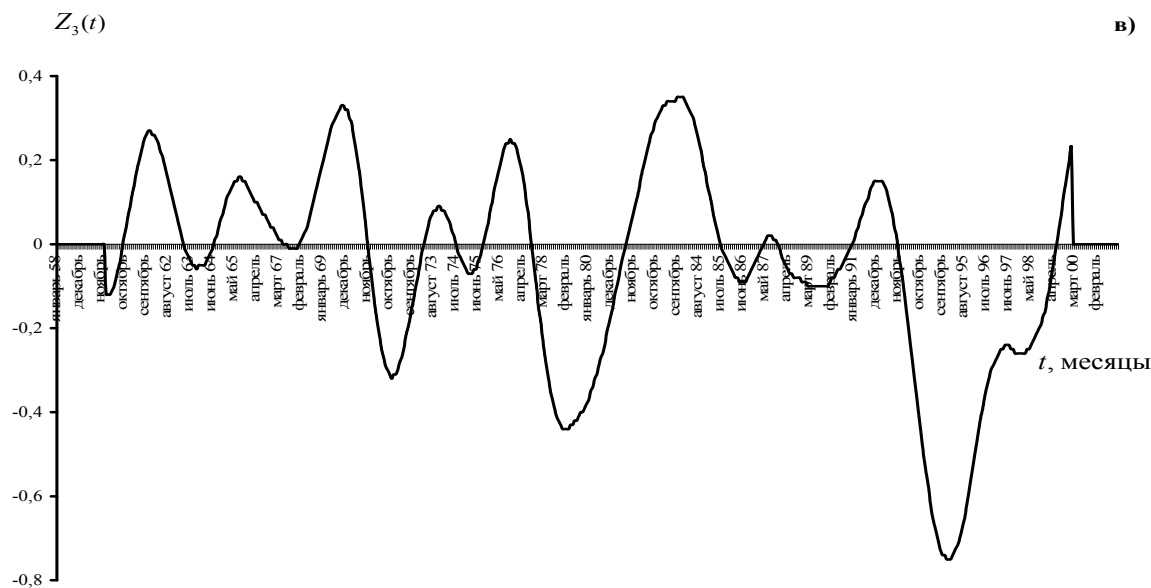


Рис. 6 – Сглаженный временной ряд первой (а), второй (б) и третьей (в) главных компонент полей температуры

Сглаженный ряд третьей главной компоненты является более упорядоченным. В нем наблюдаются хорошо выраженные колебания в 8-10 лет, на которые накладываются 4-5 летние колебания.

Сглаженные временные ряды главных компонент полей температуры воздуха обладают интересной особенностью. Она заключается в том, что сравнение времени наступления максимумов и минимумов во временных рядах главных компонент, которые представлены на рис. 6, с данными, приведенными в работе Тренберса [11], показывает, что почти во всех случаях максимумы значений главных компонент совпадают по времени с теплым событием El-Niño, а минимумы – с холодным событием La-Niña. Это является еще одним подтверждением того, что ENSO оказывает влияние на формирование полей температуры воздуха не только у подстилающей поверхности, что подтверждается в ряде работ, но и в средней тропосфере.

**Выводы.** Проведенный компонентный анализ полей температуры воздуха дал возможность сделать следующие выводы:

1. Структура дисперсий ортогональных компонент полей температуры свидетельствует о том, что первая главная компонента полей температуры отражает самые крупномасштабные особенности полей, которые обуславливаются наиболее крупномасштабными атмосферными процессами.

2. Энергетические спектры главных компонент характеризуются наличием статистически обусловленных всплесков ( $p=0,95$ ) на частотах, соответствующих временным интервалам сезонной продолжительности, годовым, 3-4 летним, 6-8 летним, а также декадными временными интервалами. Именно такие периоды времени присущи явлению ENSO.

3. Сглаживание временных рядов главных компонент полей температуры путем скользящего осреднения с косинус-фильтром характеризуются значительной изменчивостью с периодами от 3-4 до 8-10 лет. Во-первых, такие периоды совпадают с временными интервалами, обнаруженными с помощью спектрального анализа их последовательностей, во-вторых, определяют периоды с разными интенсивностями

атмосферных процессов, под действием которых происходили формирования разномасштабных составляющих полей температуры воздуха в средней тропосфере.

### Список литературы

1. Van Loon H, Shea DJ. The southern oscillation, VI, anomalies of sea level pressure on the Southern Hemisphere and of Pacific sea surface temperature during the development of a warm event. // *Monthly Weather Review* – 1987. – №115: P. 370-379.
2. Mo KC, White GH. Teleconnections in the Southern Hemisphere. // *Monthly Weather Review* – 1985. – №113: P. 22-37.
3. Krishnamurti TN, Chu SH, Iglesias W. On the sea level pressure of the southern oscillation. // *Archiv für Meteorologic, Geophysik und Bioklimatologie, Serie* – 1986. – №A 34: P. 385-425.
4. Hoskins BJ, Karoly DJ. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. // *Journal of the Atmospheric Sciences* – 1981. – №38: P. 1179-1196.
5. Karoly DJ. Southern Hemisphere circulation features associated with El Niño-southern oscillation events. // *Journal of Climate* – 1989. – №2: P. 1239-1252.
6. White WB, Peterson RG. An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent. // *Nature* – 1996. – №380: P. 699-702.
7. Школьный Є.П., Лосева І.Д., Гончарова Л.Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]– К.: Міносвіти України, 1999.– 600 с.
8. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М. «Наука», 1978. - 177 – 181 с.
9. Кендалл М. Дж., Стюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. – М. «Наука», 1976. - 736 с.
10. Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория М. «Мир», 1980. - 539 с.
11. Trenberth KE. The definition of El Niño. // *Bulletin of the American Meteorological Society* – 1997. – №78: P. 2771–2777.

**Особливості статистичної структури полів температури повітря у вільній атмосфері в західному секторі Південної півкулі. Собченко А.Ю.**

*У роботі містяться результати досліджень статистичної структури полів температури повітря в середній тропосфері в західному секторі Південної півкулі. Наведено особливості часової мінливості температури повітря в атмосфері. Зроблена спроба виявити реакцію на поля температури процесів Ель-Ніньо-Південне коливання. Дослідження проводяться за допомогою методів багатовимірного статистичного аналізу та теорії випадкових процесів.*

**Ключові слова:** власний вектор, головна компонента, спектральна щільність, прихована періодичність, поле.

**Features of statistical structure of air temperature fields in free atmosphere in the western sector of Southern hemisphere. Sobchenko A.Y.**

*This work contains the results of studies of the statistical structure of the temperature fields of air in the middle troposphere in the western sector of the Southern Hemisphere. It was showed the features of temporal variability of air temperature in the atmosphere. An attempt is made to identify the response of the temperature field in the processes of the El Niño-Southern Oscillation. Researches are carried out by the methods of multivariate statistical analysis and the theory of stochastic processes.*

**Keywords:** eigenvector, the main component, spectral density, hidden periodicity, pitch.