

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОЛЕЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЯ

*Выявлены основные особенности статистической структуры полей общего содержания озона (ОСО) в западном секторе южного полушария. Получены главные компоненты этих полей. Показаны особенности временной изменчивости компонент ОСО в атмосфере во второй половине XX столетия. Определены статистически значимые скрытые периодичности и трендовые составляющие во временных рядах главных компонент.*

**Ключевые слова:** общее содержание озона, структура, поля, главные компоненты, периодичности.

**Вступление.** Одной из проблем глобального характера в настоящее время является проблема озонового слоя Земли. Суть её состоит в том, что, как было установлено во второй половине прошлого столетия, происходит периодическое истощение концентрации озона в озоносфере с образованием так называемых «озоновых дыр». Это явление особо ярко проявляется в Антарктике и прилегающих регионах. Причины и механизмы глобального истощения озонового слоя, поглощающего, как известно, основную часть ультрафиолетового излучения Солнца, до сих пор не выяснены, хотя имеется ряд сформулированных на этот счет гипотез. Это является причиной появления широкого круга исследований, относящихся к озоносфере [1 - 5].

Благодаря развитию спутниковых измерений концентрации общего содержания озона (ОСО) появилась возможность сформировать статистическую совокупность полей этой характеристики озона, что, в свою очередь. Позволяет произвести детальные исследования статистической структуры этих полей. До сих пор сведения о глубоких исследованиях этой проблемы в литературе отсутствуют.

В настоящее время принято считать, что изменения концентрации ОСО осуществляется за счет фотохимических реакций при поглощении квантов жёсткого солнечного излучения атмосферными газами в стратосфере, с одной стороны, и под действиями динамических процессов в атмосфере, с другой. Большое внимание влиянию атмосферных процессов на озоновый слой уделено в монографии [1].

Установлению детальных характеристик статистической структуры полей ОСО позволит, как нам представляется, установить их взаимосвязи с соответствующими характеристиками полей геопотенциальных высот, а следовательно изучить особенности влияния динамических факторов на процессы формирования полей ОСО.

**Материалы и методы исследований.** В качестве исходной информации были использованы данные ре-анализа ERA – 40 полей ОСО, заданные в узлах регулярной сетки точек  $2,5^\circ$  на  $2,5^\circ$ , в секторе ограниченном по широте от Южного полюса до  $20^\circ$  ю.ш. и меридианами  $0 - 120^\circ$  з.д., за период с 1958 г по 2002 г для каждого месяца года. В рассматриваемый сектор входит Антарктический полуостров, на котором располагается украинская антарктическая станция «Академик Вернадский».

Поля исследуемых физических величин в атмосфере формируются под воздействием атмосферных процессов разных масштабов: процессов макромасштаба, синоптического масштаба, мезомасштаба и процессов еще более мелкого масштаба. В результате эта 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, эффективным является применение компонентного анализа [6] (в литературе иногда называют методом «эмпирических ортогональных функций»), который заключается в том, что проводится параметризация состава факторов, то есть в модели используются новые величины, являющиеся линейными комбинациями исходных данных. Новые факторы должны быть взаимно некоррелированными (ортогональными) и чтобы при возможно меньшем их количестве учитывалась значимая часть изменчивости исходных величин. Компонентный анализ применяется, также при решении задачи сжатия информации (значительное сокращение количества информации при сохранении основного ее содержания) и задачи фильтрации исходной информации. Ниже рассмотрим краткое его содержание.

**Результаты исследований и их анализ. Корреляционный и компонентный анализ полей ОСО.** На основе исходных данных были сформированы матрицы для каждого месяца

$$X = (x_{ij})_{n \times m}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество узлов регулярной сетки точек, в которых заданы значения ОСО;

$m$  – количество полей в каждом месяце ( $m = 44$ ).

После расчета средних полей, было произведено центрирование матриц исходных данных  $\Delta X$  и расчет матриц ковариаций

$$K_x = \frac{1}{m} \Delta X \Delta X', \quad (2)$$

где (') – операция транспонирования матриц.

На главной диагонали матрицы  $K_x$  располагаются дисперсии ОСО в соответствующей точке поля. На основе  $diag K_x$  строится диагональная матрица среднеквадратических отклонений  $\sigma$ . Обратная матрица от нее  $\sigma^{-1}$  определяется таким образом

$$\sigma^{-1} = \left\{ \frac{1}{\sigma_{x_{ij}}} \right\}. \quad (3)$$

Матрица корреляции для множества числа  $m$  полей, которые рассматриваются, равняется

$$R_x = \sigma^{-1} K_x \sigma^{-1}. \quad (4)$$

Матрица корреляции содержит информацию о полях корреляций с полюсами корреляций в тех узлах сетки, для которых номер столбца матрицы совпадает с номером строки. Анализ полей корреляции дает возможность сделать вывод о квазиоднородности и квазиизотропности исследуемых полей. Подробный анализ полей средних значений, среднеквадратических отклонений и полей корреляций ОСО содержится в работе [7].

В дальнейшем на основе матриц ковариаций был проведен компонентный анализ [6], который позволяет выявить важные особенности структуры и динамики крупномасштабных атмосферных процессов. Основное уравнение полной проблемы собственных значений имеет вид

$$K_x W_i = \lambda_i W_i, \quad (5)$$

где  $\lambda_i$  -  $i$ -тое собственное значение;

$W_i$  - соответствующий ему  $i$ -тый собственный вектор.

Матрица собственных векторов

$$W = \{W_{ij}\}_{n \times n} \quad (6)$$

( $i$  – определяет номер компоненты, а  $j$  – номер вектора) является ортогональной, то есть

$$WW' = W'W = E, \quad (7)$$

где  $E$  – единичная матрица.

В ортогональном базисе  $W$  проводится разложение совокупности центрированных полей ОСО  $\Delta X$

$$W' \Delta X = Z, \quad (8)$$

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

Поскольку базис, который определяется матрицей  $W$  является ортогональным, компоненты  $Z_i$   $i$ -того поля имеют свойство независимых или ортогональных случайных величин.

Собственные значения  $\lambda_i (i = \overline{1, n})$  являются дисперсиями  $\sigma_{Z_i}^2$  ортогональных компонент исследуемых полей.

Как было показано выше,  $n$ -мерные матрицы ковариаций случайных физических величин дают возможность получить систему ортонормированных собственных векторов  $W_i (i = \overline{1, n})$ , которые в совокупности представляют базис  $n$ -мерного евклидова пространства, и соответствующих им собственных значений  $\lambda_i (i = \overline{1, n})$ . Это позволяет произвести разложение  $n$ -мерных векторов – полей физической величины в указанном базисе, которое дает соответствующую совокупность ортогональных компонент этих полей. Анализ собственных значений  $\lambda_i$ , позволяет из системы ортогональных компонент выделить главные компоненты, то есть те, дисперсии которых исчерпывают большую долю суммарной дисперсии полей, и, следовательно, которые отражают наиболее значимую информацию о преобразовании структуре полей рассматриваемой физической величины. Относительные значения (по отношению к суммарной дисперсии) дисперсий первых трёх ортогональных компонент полей ОСО

$$\eta = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \sigma_{x_i}^2} \quad (i=1,2,3) \quad (9)$$

приводятся на рис. 1, из которого следует, что преобладающую долю суммарной дисперсии исчерпывает первое собственное значение. На его долю приходится от 82 до 53% суммарной дисперсии полей ОСО, в то время как второму собственному значению соответствует от 6 до 18%, а третьему – всего лишь от 3 до 9%. Таким образом, основную информацию об особенностях процессов формирования полей ОСО в западном секторе южного полушария несут в себе первые два собственных вектора, а следовательно и первые две ортогональные компоненты полей ОСО, то есть две главные компоненты. Прежде всего, проанализируем собственные значения и собственные векторы.

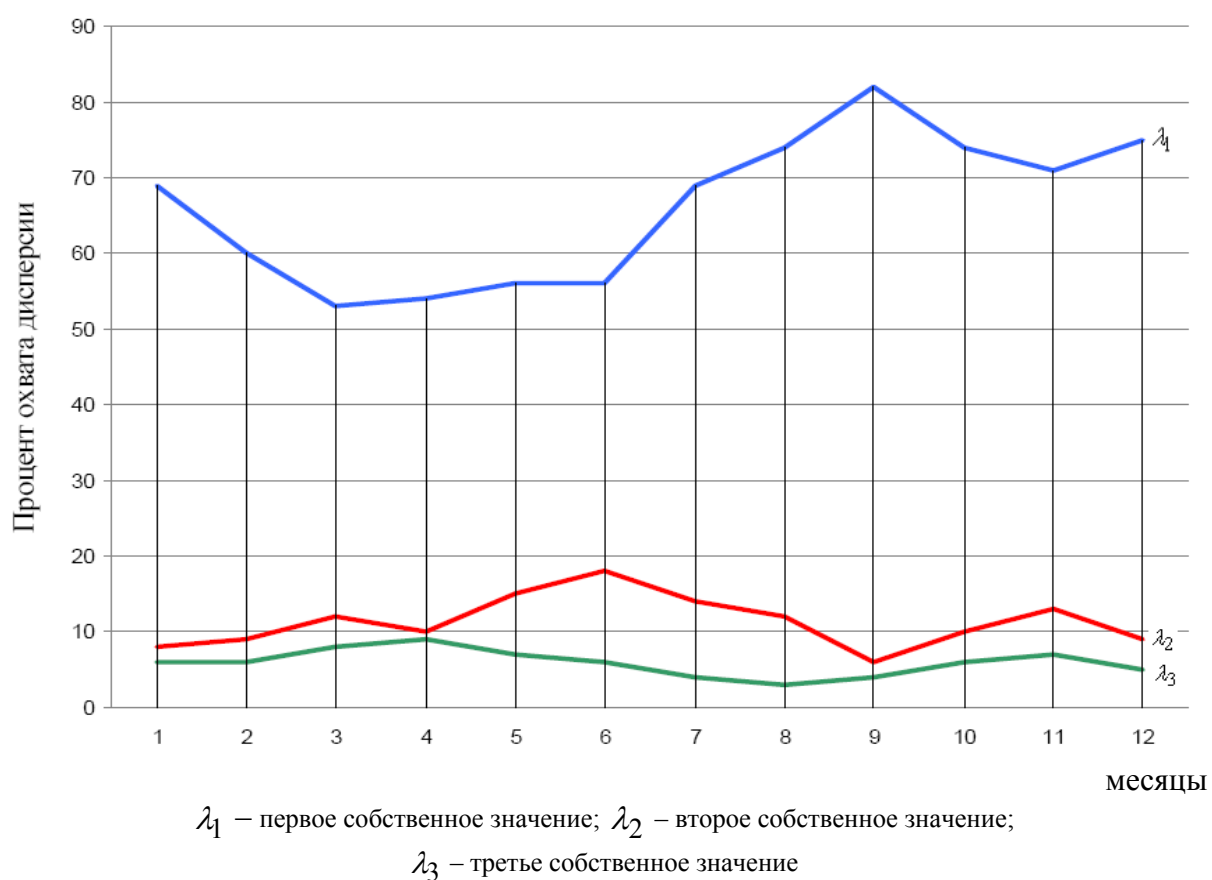


Рис. 1 – Процент охвата суммарной дисперсии первым, вторым и третьим собственными значениями общего содержания озона в западном секторе ( $0 - 120^\circ$  з.д.) южного полушария.

Как следует из рис. 1 наблюдается хорошо выраженный временной ход первых двух собственных значений: наименьшие величины первого собственного значения приходится на период осени и начала зимы, а наибольшие в зимне-весенний период. Самые большие величины второго собственного значения имеют место в месяцы зимы. Из этого следует, что особенности формирования полей ОСО в указанный период года определяются более крупномасштабными процессами, чем в осенний сезон. Эти

процессы, надо полагать, должны найти отражение в полях первых двух собственных векторов, которые соответствуют рассмотренным выше собственным значениям.

Поля первого собственного вектора имеют большое сходство с соответствующими полями среднеквадратических отклонений. В качестве примера на рис. 2 приводятся поля первых собственных векторов для января и июля. Это сходство объясняется тем, что, как было показано, большую часть суммарной дисперсии исчерпывают первые собственные значения, а поля соответствующих им собственных векторов отражают этот факт.

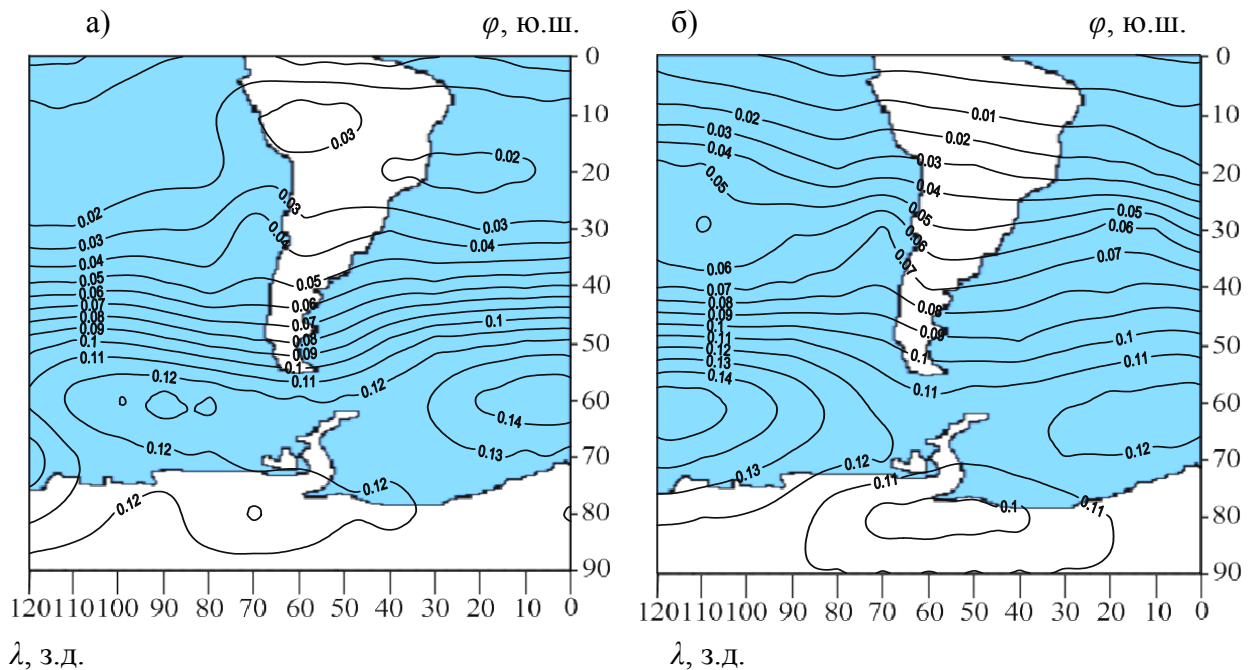


Рис. 2 – Поля первого собственного вектора ОСО (январь) (а) и (июль) (б).

Вторые собственные векторы характеризуют более мелкомасштабные процессы формирования полей ОСО, поскольку соответствующие им собственные значения обуславливают менее 20% суммарной дисперсии полей ОСО.

Поля второго собственного вектора обладают рядом особенностей. Во-первых, во все месяцы они содержат лишь одну переменную знака, т.е. разделяются на области положительных и отрицательных значений. Это является свидетельством хорошей обусловленности матриц ковариаций полей ОСО. Во-вторых, имеет место отчетливо проявляющаяся трансформация структуры этих полей. В январе наблюдается хорошо выраженная пучность в юго-западной части рассматриваемого региона, охватывающая часть материка с Антарктическим полуостровом и примыкающую акваторию южной части Тихого океана, а остальная часть региона охвачена отрицательными значениями с центром над приэкваториальной акваторией южной Атлантики (рис. 3, а). В осенние месяцы (рис. 3, б) область положительных значений постепенно перемещается на северо-восток и расширяется по площади, так что к зиме (рис. 4, а) формируется пояс положительных значений компонент второго собственного вектора с осью на 40 – 45° ю.ш., а над побережьем Антарктиды и прилегающим морям (море Беллингаузена, море Уэдделла) располагается зона с отрицательными их значениями. В течение весны зона положительных значений вновь постепенно перемещается к юго-западу, в ней усиливаются градиенты, так что к середине (рис. 4, б) и к концу весны – началу лета формируется область положительных значений координат второго

собственного вектора, охватывающая южную акваторию Тихого океана, южную часть Южной Америки, большую территорию прибрежной Антарктиды. Эта область отличается очень большими горизонтальными градиентами второго собственного вектора, то есть второй ортогональной функции.

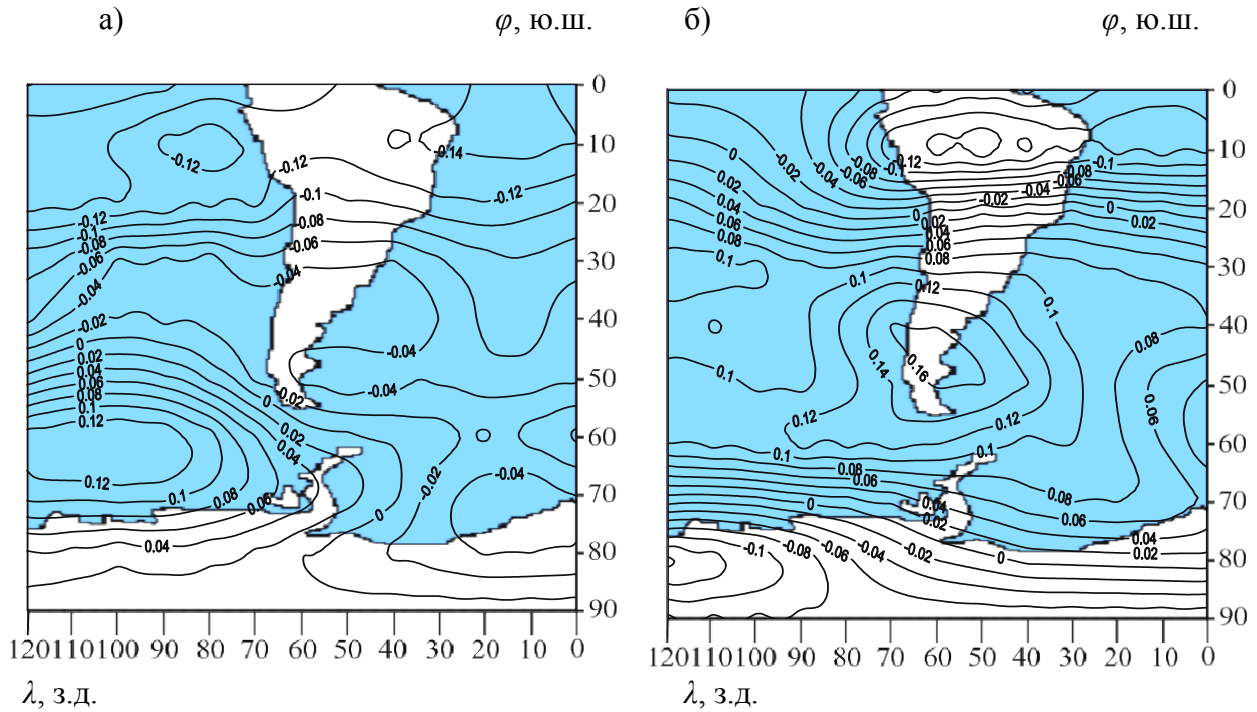


Рис. 3 – Поля второго собственного вектора ОСО (январь (а) и март (б)).

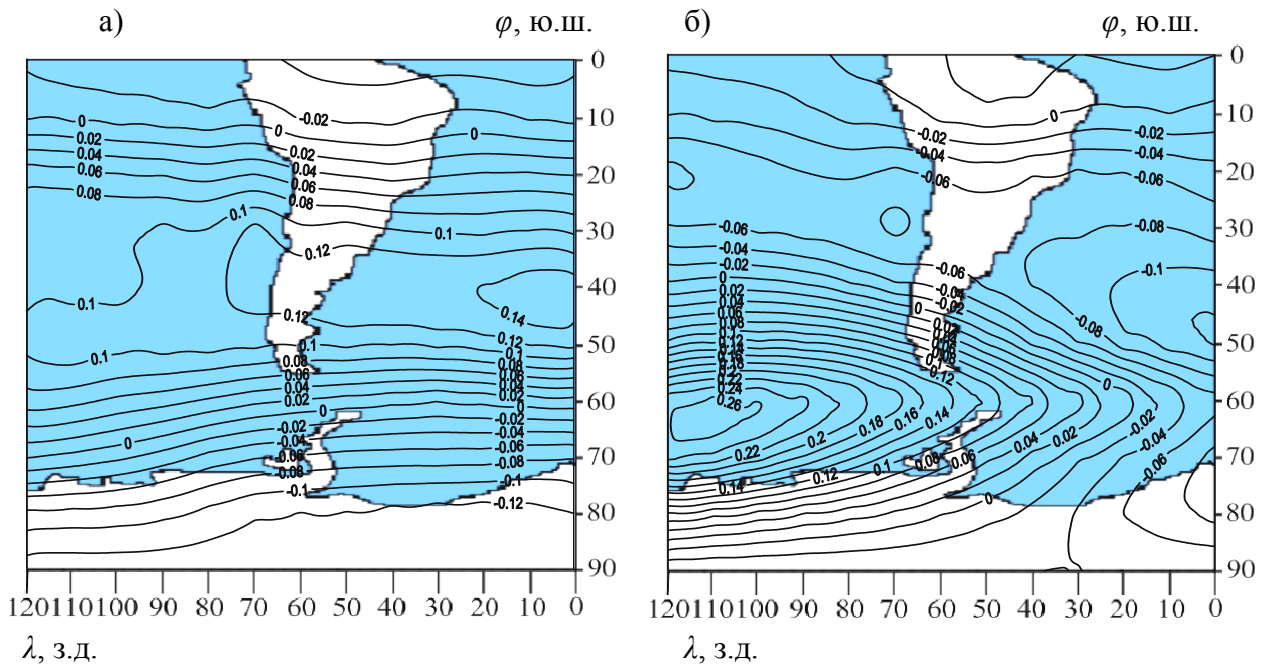


Рис. 4 – Поля второго собственного вектора ОСО (июль (а) и (октябрь) (б)).

Следует отметить, что такая структура полей второго собственного векторов, формирующаяся в период конца зимы и весной, совпадает с отмечающимся периодом весеннего минимума содержания озона в высоких широтах Южного полушария.

**Статистическая структура временных рядов главных компонент полей ОСО.** Путем ортогонального преобразования полей ОСО в базисе собственных векторов были получены ортогональные компоненты полей ОСО. Показано, что более 80% суммарной дисперсии полей исчерпывают первые три собственные значения, а, следовательно, основная информация об особенностях статистической структуры полей и особенностях ее формирования содержится в трех главных компонентах. Поскольку ортогональному преобразованию подвергалось каждое поле среднемесячных значений ОСО, то это позволило сформировать временные последовательности  $Z_1(t)$ ,  $Z_2(t)$  и  $Z_3(t)$  с месячной дискретностью объемом 540 значений для каждой из указанных главных компонент. Временные ряды первых двух главных компонент полей ОСО представлены на рис. 5 и 6. Они свидетельствуют о том, что временные ряды главных компонент содержат трендовые и периодические составляющие, на которые накладываются случайные возмущения. Прежде всего, произведем выделение скрытых периодичностей в указанных временных рядах.

Для функции  $Z(t)$ , определенной на интервале  $[-\tau, \tau]$  и имеющей конечное число точек разрыва первого рода справедливым является преобразование Фурье, с помощью которого можно отфильтровать значимые периодичности [6].

Функцию  $Z(t)$  можно представить в виде суперпозиции простых гармоник

$$Z(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (10)$$

где  $A_k$  амплитуда  $k$ -той гармоники;  $\omega_k$  - ее частота;  $\varphi_k$  - начальная фаза.

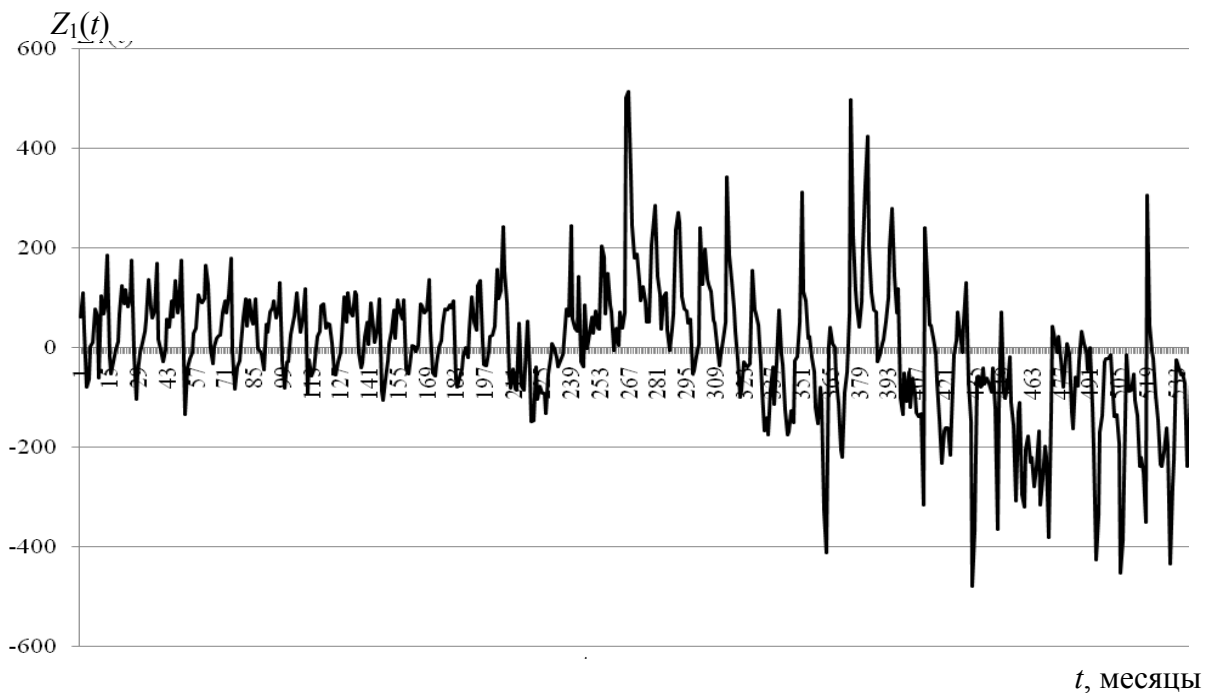


Рис. 5 – Временной ряд первой главной компоненты полей ОСО.

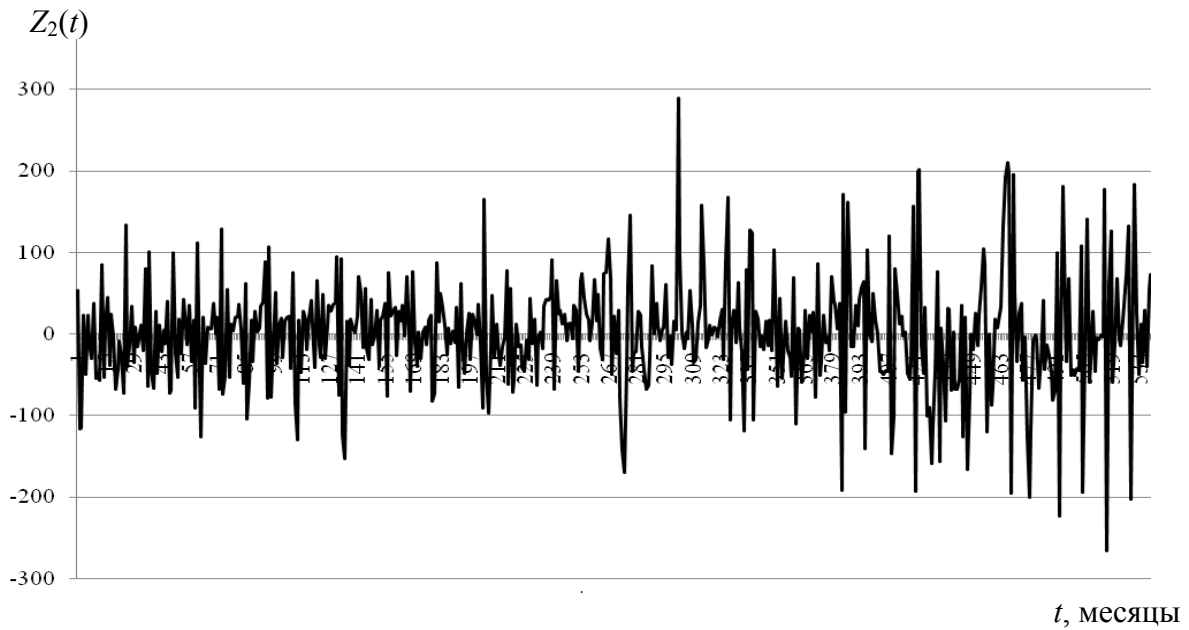


Рис. 6 – Временной ряд второй главной компоненты полей ОСО.

Результаты расчетов дали возможность получить амплитудно-частотные характеристики  $A(\omega_k)$  для каждого из процессов  $Z_i(t)$  ( $i = 1, 2, 3$ ). При этом, считались значимыми с вероятностью  $p = 0.68$  периодичности с частотой  $\omega_k$ , амплитуды для которых выходят за уровень значений  $\bar{A} + \sigma_A$ , где  $\bar{A}$  - средние значения амплитуд суперпозиции (10), а  $\sigma_A$  - их среднеквадратическое отклонение. Для каждого значимого колебания с частотой  $\omega_k$  были рассчитаны периоды  $T_k$  и начальные фазы  $\varphi_k$ . В качестве примера на рис. 7 представлена амплитудно-частотная характеристика для первой главной компоненты, а характеристики выявленных периодичностей у первых трёх ортогональных компонент в табл. 1. Как следует из табл. 1, во временных рядах главных компонент полей ОСО скрыты статистически значимые периодичности.

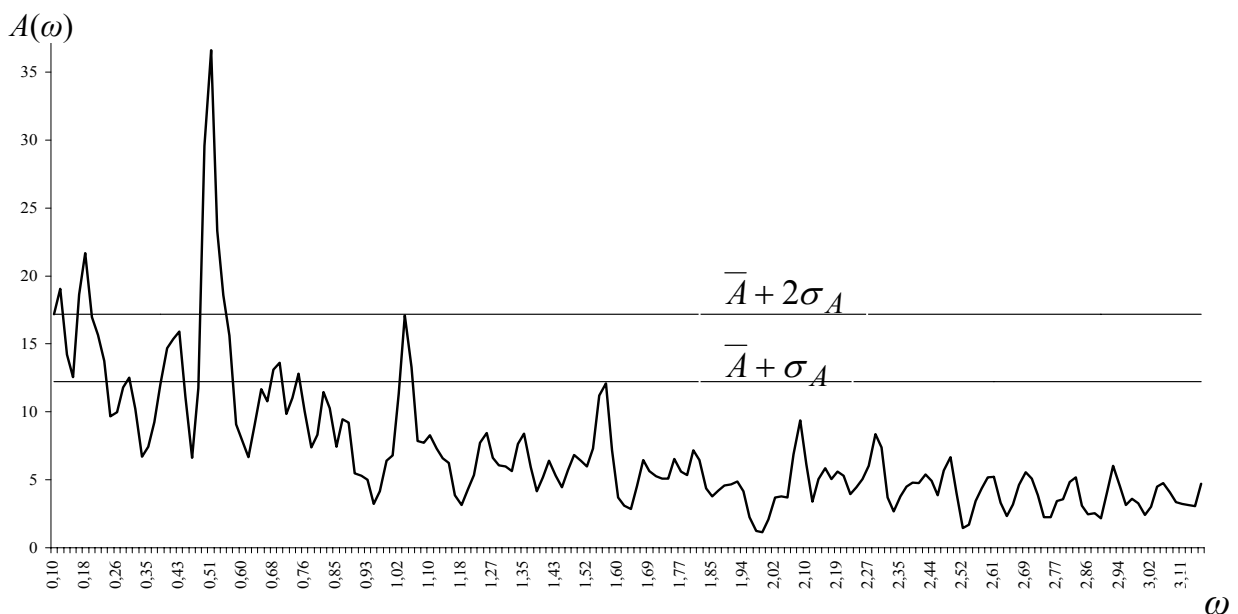


Рис. 7 – Амплитудно-частотная характеристика первой главной компоненты ОСО.



Таблица 1 – Скрытые периодичности в временных рядах главных компонент полей общего содержания озона

к	$\omega_k$ , месяц <sup>-1</sup>	$T_k$ , месяц	$T_k$ , год	$A_k$ , Е.Д.
Первая главная компонента				
6	0,112	56,075	4,7	19,039
10	0,179	35,108	2,9	21,657
17	0,296	21,222	1,8	12,533
30	0,514	12,235	1,0	36,596
41	0,698	9,007	0,8	13,623
44	0,748	8,403	0,7	12,806
61	1,032	6,088	0,5	17,113
Вторая главная компонента				
5	0,095	65,915	5,49	8,589
30	0,514	12,235	1,02	10,469
34	0,58	10,825	0,90	7,53
61	1,032	6,088	0,51	13,274
124	2,086	3,012	0,25	16,154
Третья главная компонента				
3	0,062	101,563	8,46	5,85
30	0,514	12,235	1,02	6,203
34	0,58	10,825	0,90	5,223
57	0,965	6,51	0,54	5,163
62	1,049	5,991	0,50	12,28
93	1,567	4,009	0,33	5,47
124	2,086	3,012	0,25	4,633

В первой и второй главных компонентах наибольшие амплитуды колебаний, как свидетельствуют соответствующие амплитудно-частотные характеристики и данные табл. 1, приходятся на периоды 5-6 лет. Кроме того, во временном ряду первой главной компоненты обнаруживаются квазитрехлетняя, двухгодичная, годовая и полугодовая периодичности. Годовые и полугодовые цикличности, а также цикличности сезонного характера имеют место во временных рядах второй и третьей главных компонент. Обращает на себя внимание наличие в третьей главной компоненте колебания с квазидевятилетним периодом, который близок к наблюдающимся в атмосферных и океанических процессах так называемой декадной осцилляции.

Анализ периодичностей, выявленных во временных рядах главных компонент полей ОСО дает основания проводить их сглаживание с целью определения содержащихся в них трендовых компонент. Оператором сглаживания является скользящее осреднение, с периодом, который соответствует одной из периодичностей, содержащейся во временном ряду. При этом, как известно, 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. Чем меньше период сглаживания, тем большей является реакция фильтра, но тем хуже его фильтрующие качества, и на оборот. Указанные особенности скользящего осреднения приводят к тому, что при очень большом периоде сглаживания из детерминированной основы процесса отфильтровывается определенная часть периодических компонент, которая переходит в случайную компоненту процесса. Если же период сглаживания мал, часть случайной компоненты процесса переходит в детерминированную основу, а оставшаяся часть случайной компоненты приобретает свойства «белого шума».

Оператор скользящего осреднения имеет вид

$$Z(t_k) = \frac{1}{l} \sum_{i=k-\frac{l}{2}}^{k+\frac{l}{2}} \alpha_i Z(t_i), \quad (11)$$

где  $l$  - длина отрезка осреднения (количество точек, по которым проводится сглаживание);  $k$  - середина отрезка сглаживания;  $\alpha_i$  - весовой множитель  $i$ -той точки.

В качестве весового множителя использовалось выражение

$$\alpha_i = 1 + \cos \frac{2\pi(k-i)}{l}. \quad (12)$$

Оператор (11) с таким весовым множителем называют косинус-фильтром [6].

Период сглаживания  $l$  при сглаживании исходных временных рядов выбран, в соответствии с изложенными выше рекомендациями, длиной отрезка, соответствующего 4 годам ( $l = 48$  точек).

Сглаженные ряды дают возможность проследить как происходило изменение структуры полей ОСО во второй половине XX и в начале XXI столетий. При этом еще раз подчеркнем, что первая главная компонента отражает наиболее крупномасштабные особенности структуры этих полей.

Сглаженные ряды первой главной компоненты приводятся для центральных месяцев сезонов южного полушария на рис. 8.

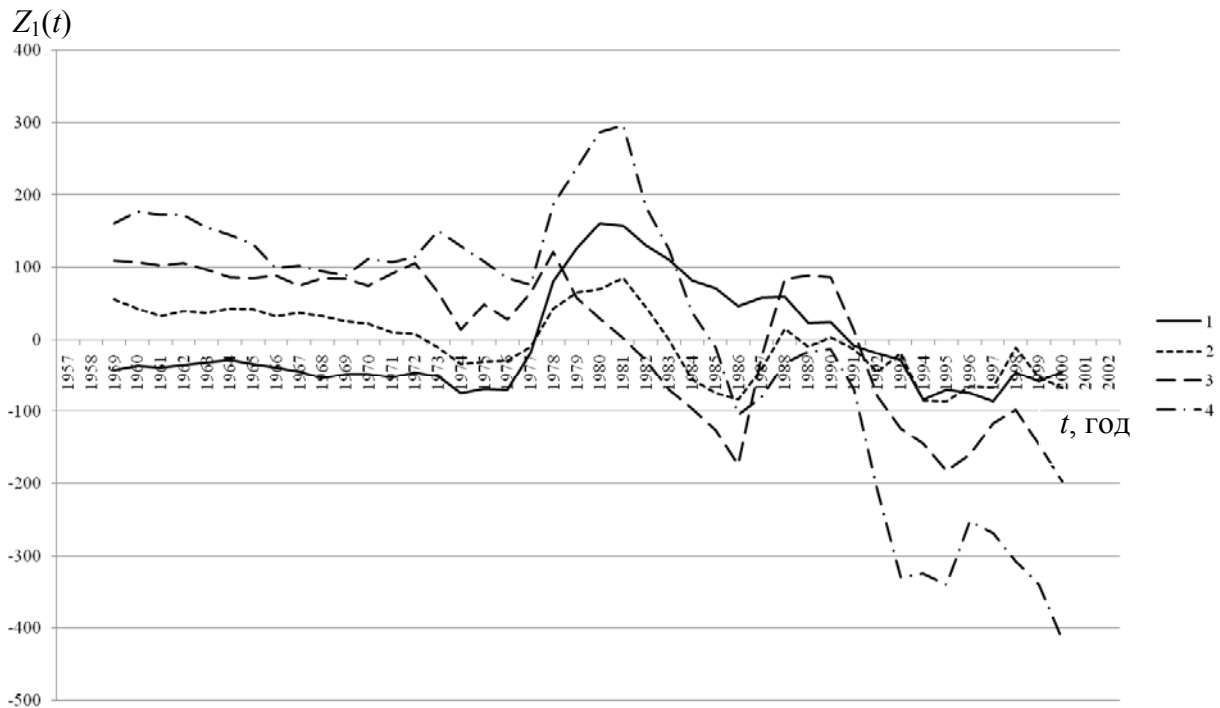


Рис. 8 – Сглаженный ряд первой главной компоненты ОСО в январе (1), апреле (2), июле (3) и октябре (4).

В месяцы лета (рис. 8) до 1976 г. первая главная компонента с 1960 г. имеет небольшие отрицательные значения. Затем происходит резкий ее рост и в течении 4-5 лет она уже превышает 150 единиц Добсона (Е.Д.). После 1976 г. происходит быстрое ее уменьшение и к концу рассматриваемого периода первая главная компонента полей ОСО достигает минус 30-50 Е.Д. Картина временной изменчивости первой главной компоненты типична для всех месяцев летнего сезона.

Столь быстрый рост, а затем падение первой главной компоненты невозможно объяснить увеличением точности измерений ОСО за счет развития спутниковых систем наблюдения, поскольку указанный феномен изменения крупномасштабной компоненты полей ОСО существует в течение около 40 лет. По-видимому, нужно искать какой-то иной фактор, который привел к такому скачкообразному изменению крупномасштабных характеристик полей ОСО. Можно полагать, что таким фактором является изменение циркуляционных процессов в стратосфере во второй половине XX века, что сказалось на условии поступления озона в стратосферу из тропического «резервуара».

Объективность существования указанного максимума в 80-е годы прошлого столетия подтверждают и графики сглаженных временных рядов первой главной компоненты в месяцы осеннего сезона (март-май). Иллюстрацией этого является рис. 8 (апрель). Кроме того, из него следует, что в месяцы осени в течение рассматриваемого периода формируется все более отчетливый тренд постепенного падения наиболее крупномасштабной составляющей полей ОСО, на фоне которого хорошо проявляется квазидвухлетнее колебание с уменьшающейся амплитудой. Отмеченная структура временных рядов первой главной компоненты наблюдается в месяцы зимы (июль) и весны (рис. 8, октябрь). Лишь в ноябре – месяце поздней весны Южного полушария – структура временного ряда первой главной компоненты полей ОСО перестраивается и становится подобной структуре летних типов.

Поскольку вклад дисперсии второй главной компоненты, как показано выше, составляет около 20 % суммарной дисперсии полей ОСО лишь в зимние месяцы, т.е. в период с мая по август, а в остальные месяцы ее вклад незначителен, рассмотрим структуру сглаженных рядов второй главной компоненты полей ОСО только в эти месяцы. Они представлены на рис. 9. Видно, что в мае с середины 60-х, а в июне с середины 70-х годов в течение всего рассматриваемого периода наблюдается тренд уменьшения второй главной компоненты полей ОСО, на который накладываются хорошо выраженные колебания с периодом 8-10 лет (рис. 9 май, июнь). В дальнейшем структура временного ряда меняется. В июле тренд падения в 1983 г. меняется на тренд роста (рис. 9 июль). В августе появляется непрерывный тренд роста (рис. 9 август). Как в июле, так и в августе на указанные тренды налагаются хорошо выраженные колебания с периодом 8-10 лет.

Как указывалось выше, вторая главная компонента отражает влияние процессов более мелкого масштаба на формирование структуры полей ОСО. Поскольку в зимний сезон в умеренных и высоких широтах развивается интенсивная циклоническая деятельность в тропосфере, которая распространяется и в нижнюю стратосферу [1], по-видимому структура второй главной компоненты обусловлена именно этими процессами.

После исключения из временных рядов детерминированной основы (трендовой компоненты и длинноволновых колебаний) были получены временные последовательности квазистационарных приращений первых трех компонент полей ОСО. Для каждой из них с помощью быстрого преобразования Фурье были рассчитаны энергетические спектры.

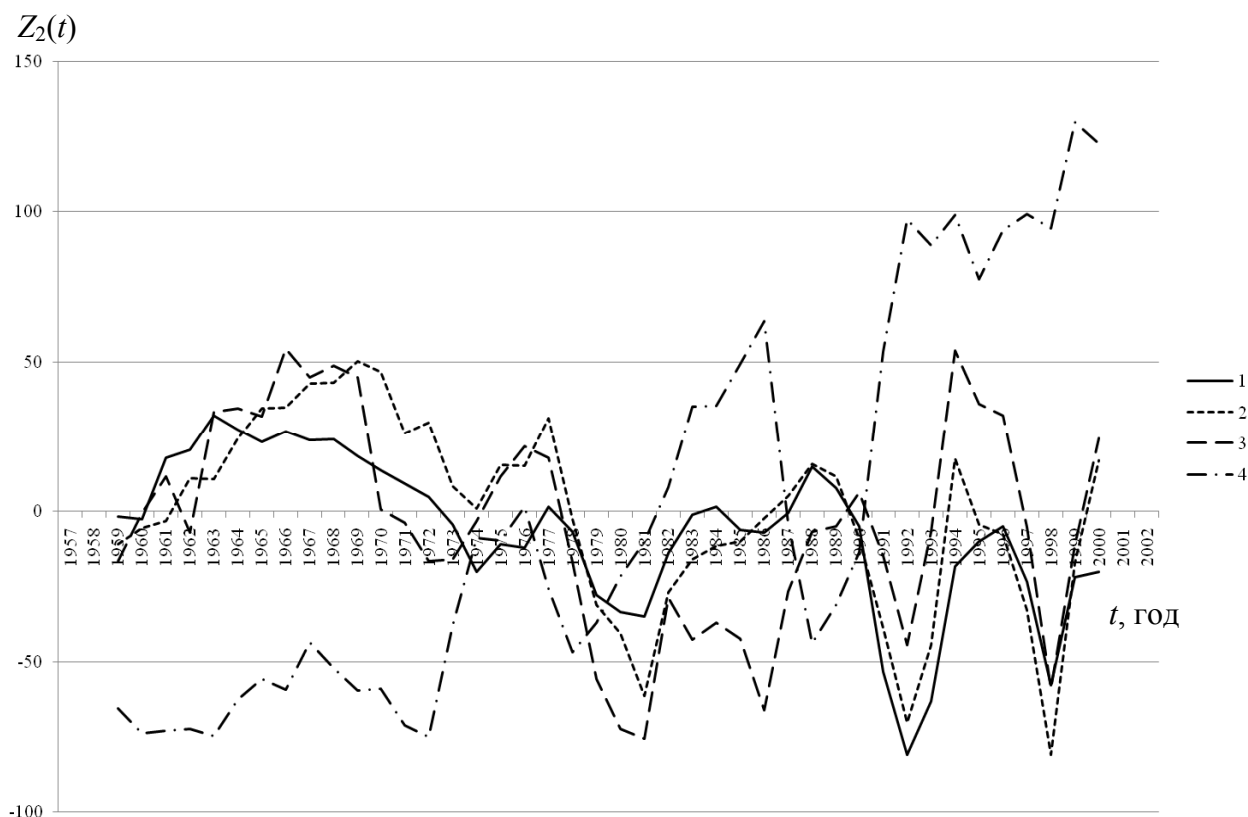


Рис. 9 – Сглаженный ряд второй главной компоненты ОСО в мае (1), июне (2), июле (3) и августе (4).

На рис. 10 содержится спектральная плотность квазистационарного приращения первой главной компоненты. Он свидетельствует о том, что в спектре первой главной компоненты четко проявляются колебания с периодом 3-4 месяца (сезонная компонента), 4 года, 7-8 лет.

В спектрах второй главной компоненты отчетливо проявляются колебания с периодами 4, 11-12 и 20 лет (рис. 11). Что касается третьей главной компоненты, то в ее энергетическом спектре в значительной мере выделяется лишь одна – 3-4 летняя периодичность.

Таким образом, как следует из представленных на рис. 10, 11 спектральных плотностей, результатов процедуры выделения в исходных временных рядах скрытых периодичностей (табл. 1), а также сглаженных временных рядов, полям ОСО присущ целый спектр периодических колебаний: от сезонных, связанных, по-видимому, с влиянием на концентрацию озона в тропосфере и стратосфере вихрей синоптического масштаба, до флуктуаций имеющих квазигодовые и многолетние периоды колебаний, в том числе соизмеримые с периодами солнечной активности. Крупномасштабные периодичности определяются характером преобразований в течение года меридиональной циркуляции, а также интенсивностью процессов в стратосфере, непосредственно связанных с изменением интенсивности фотохимических реакций в кислородном цикле, которая связана с интенсивностью излучения солнечного жесткого ультрафиолета в течение года в стратосфере низких и высоких широт. Последнее, как известно в большой мере зависит от солнечной активности.

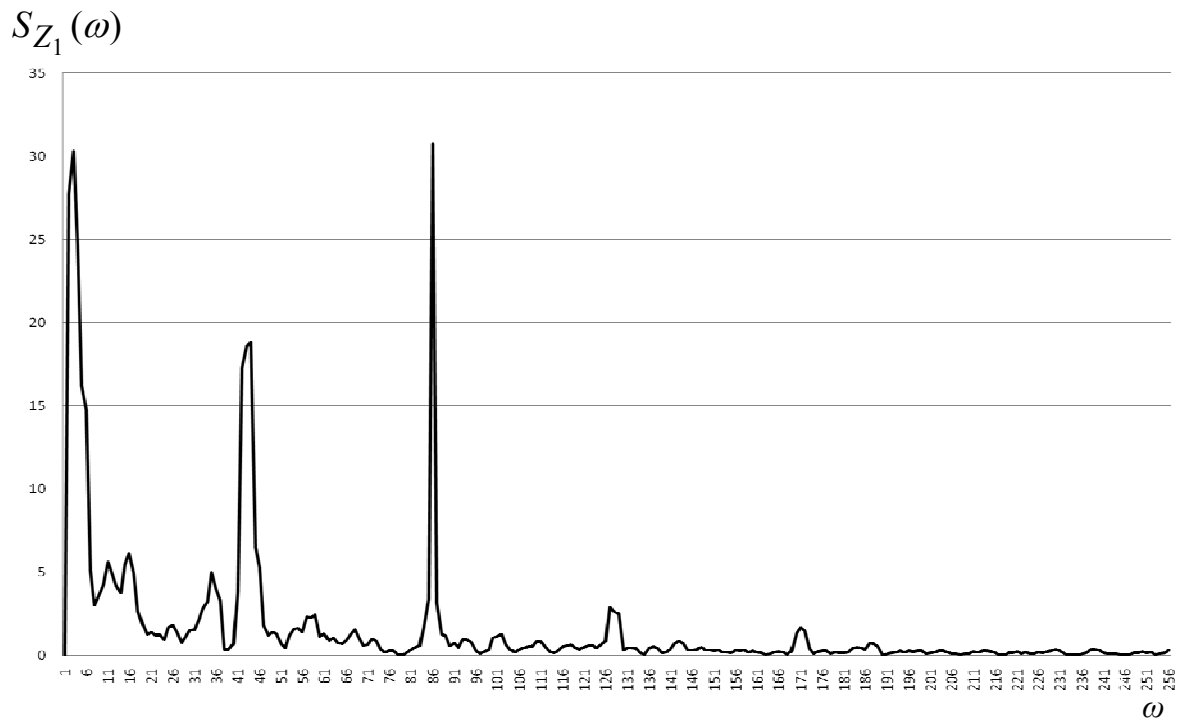


Рис. 10 – Спектральная плотность первой главной компоненты ОСО.

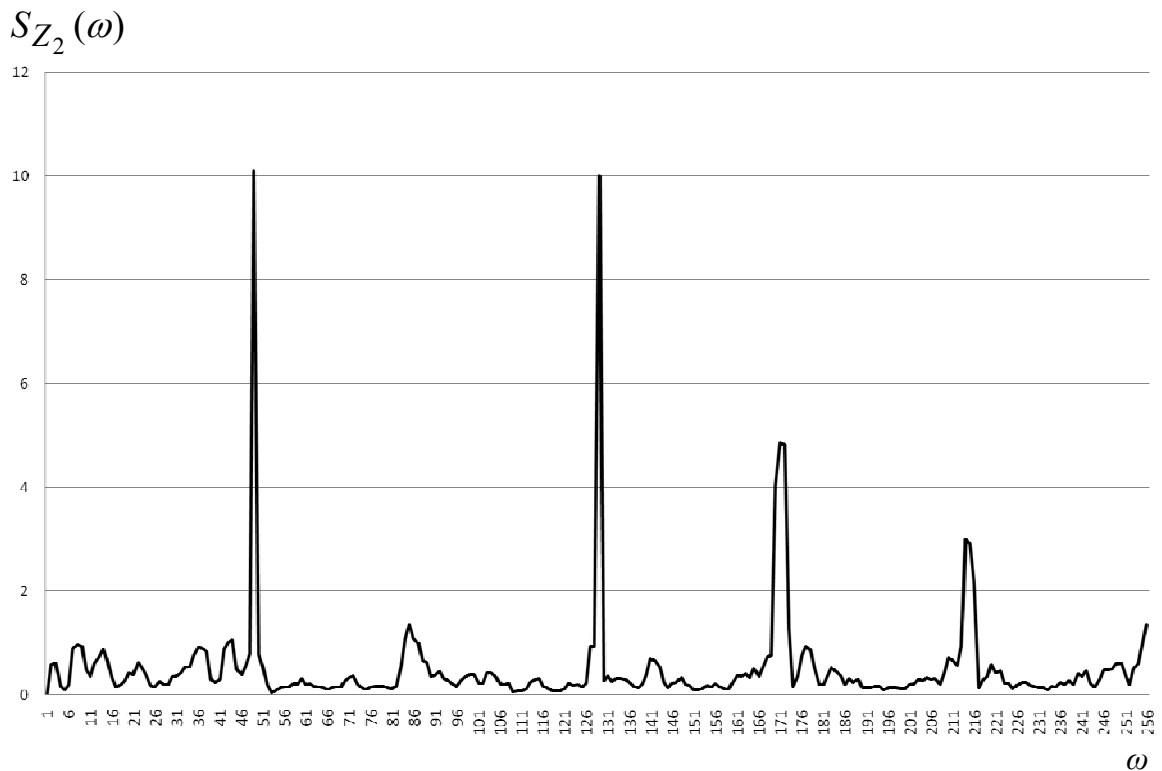


Рис. 11 – Спектральная плотность второй главной компоненты ОСО.

**Отклики полей общего содержания озона на изменения главных компонент.**  
 Как было показано выше, главные компоненты отражают основные особенности статистической структуры полей ОСО. Анализ рассмотренных выше сглаженных временных рядов для различных сезонов, показал, что им свойственны определенные тренды и длиннопериодные колебания. Представляет большой интерес рассмотреть

какие отклики наблюдались в полях ОСО на изменения главных компонент. Ответ на этот вопрос можно получить, если произвести обратное преобразование сглаженных значений главных компонент в базисе собственных векторов матриц ковариаций.

Для решения этой задачи рассмотрим вектор

$$\tilde{Z}(t_i) = \begin{pmatrix} Z_1(t_i) \\ Z_2(t_i) \\ \vdots \\ Z_k(t_i) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где  $k$  - это номер последней главной компоненты вектора ортогональных компонент  $Z(t_i)$  ( $i = \overline{1, m}$ ), число которых обуславливают преобладающую долю суммарной дисперсии полей ОСО.

Обратное преобразование векторов главных компонент  $\tilde{Z}(t_i)$  в базисе собственных векторов  $W = \{W_{ij}\}$  ( $i, j \in \overline{1, n}$ ) позволяет получить ту часть полей ОСО  $\Delta\tilde{X}(t_i)$ , которая является крупномасштабной их составляющей. Это преобразование имеет следующий вид

$$\Delta\tilde{X}(t_i) = W \cdot \tilde{Z}(t_i). \quad (14)$$

В качестве компонент  $Z(t_i)$  выступают первые главные компоненты  $Z_1(t_i)$  в те месяцы, когда их вклад является преобладающим, или первая и вторая главные компоненты  $Z_1(t_i)$  и  $Z_2(t_i)$ , когда второе собственное значение, являющееся дисперсией второй главной компоненты, вносит заметный вклад в суммарную дисперсию полей ОСО (в нашем случае в мае-августе). Поскольку компоненты  $n$ -мерного вектора  $\Delta\tilde{X}(t_i)$  это центрированные величины, то полученные в результате преобразования (14) поля в каждый момент времени  $t_i$  представляют собой поля отклонений от рассмотренных в статье [7] средних полей ОСО, т.е. являются аномалиями этих полей.

Был проведен ряд численных экспериментов, которые заключались в следующем. В центральный месяц зимы (июль) и в центральный месяц лета (январь) по значениям первых двух главных компонент, дисперсии которых, как было показано выше, в сумме составляют около 80% от суммарной дисперсии полей ОСО, рассчитывались аномалии полей ОСО. Расчеты проводились для значений главных компонент в определенные годы ( $t_i$ ), относящиеся к трендам спада или роста сглаженных значений. Полученные таким образом поля аномалий ОСО в июле представлены на рис. 12, 13 и в январе на рис. 14, 15.

Из рис. 12а следует, что когда в июле 1968 г. значения главных компонент  $Z_1(t_i)$  и  $Z_2(t_i)$  больше нуля, аномалии поля ОСО также положительны во всем рассматриваемом регионе, причем наибольшие значения приращений образуют зону с

осью вдоль 50-55° ю.ш. Положение этой зоны аномалий совпадает с расположением среднеширотного пояса высоких значений ОСО в июльском поле средних значений ОСО. В июле 1979 г., когда первая и вторая главные компоненты располагаются уже на ниспадающем тренде и значение  $Z_2(t_i)$  близко к нулю, поле аномалий также состоит положительных пиращений, но наибольшие по величине аномалии перемещаются в высокие широты южной полярной области, что видно на рис. 12б.

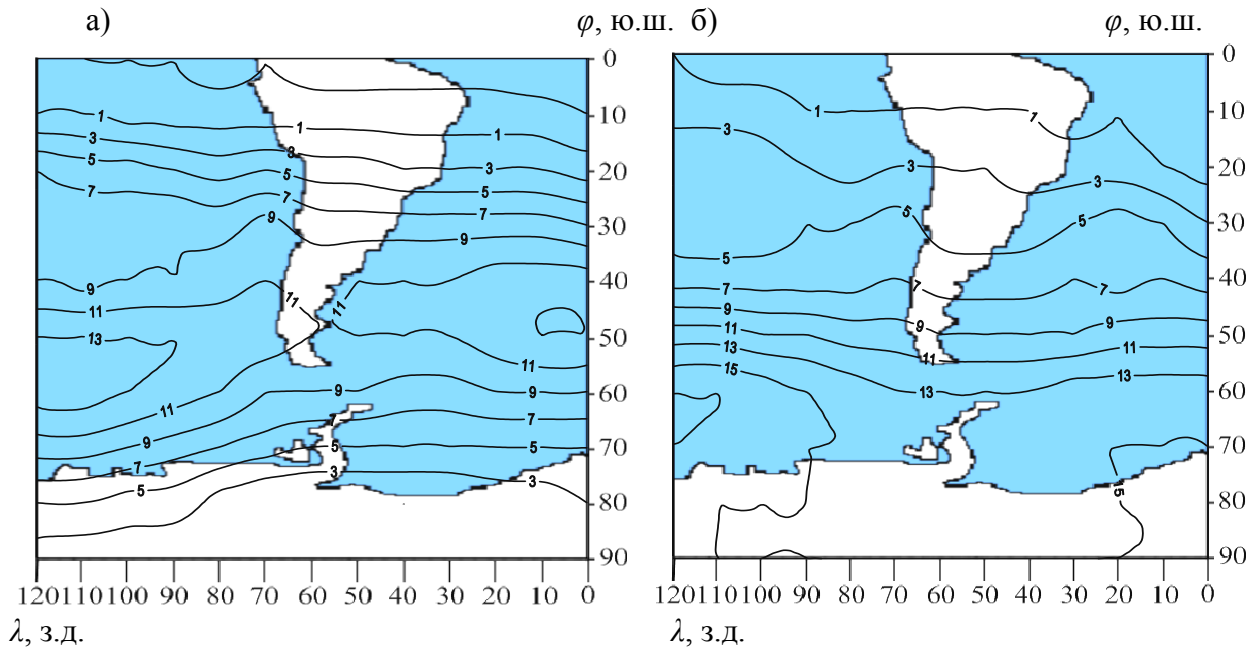


Рис. 12 – Поля аномалий ОСО в июле 1968 г. (а) и 1979 г. (б).

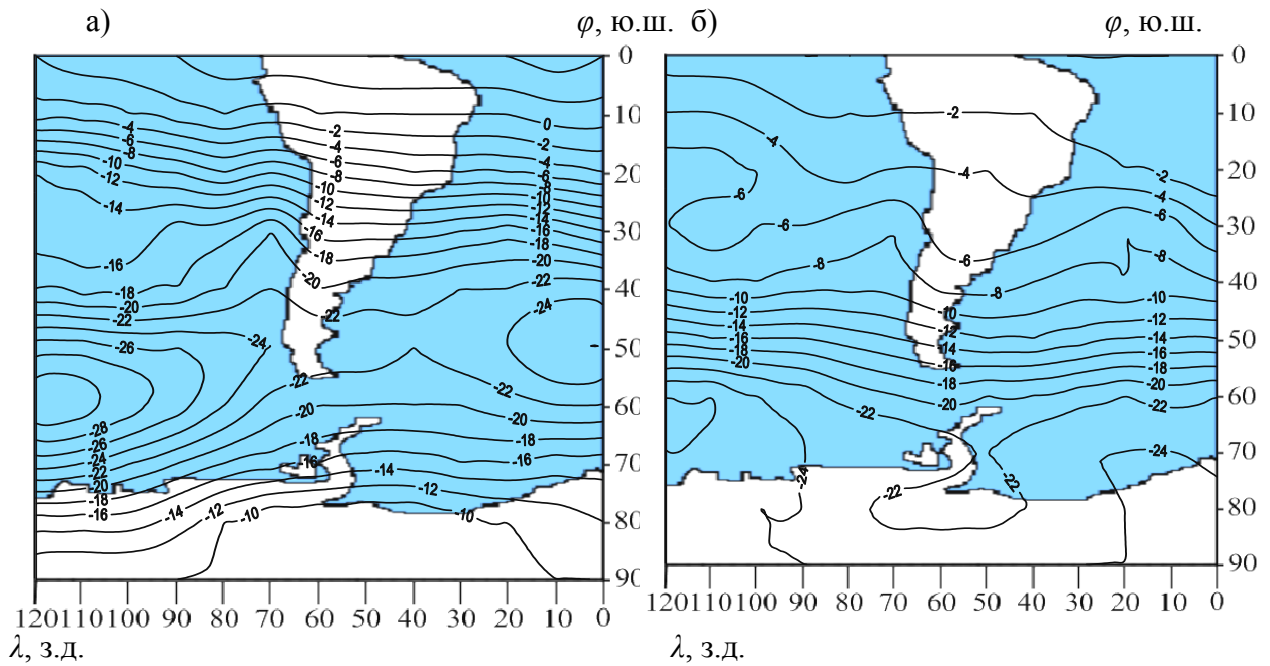


Рис. 13 – Поля аномалий ОСО в июле 1989 г. (а) и 1996 г. (б).

Совсем иную структуру имеют поля аномалий в июле 1989 и 1996 гг. В 1989 г., когда  $Z_1 < 0$  и  $Z_2 < 0$  на общем их ниспадающем тренде, весь рассматриваемый регион покрыт, за исключением приэкваториальной зоны, отрицательными аномалиями ОСО (рис. 13а), причем образуется пояс наибольших отрицательных приращений в средних широтах там, где на карте средних значений располагается зона наибольших значений ОСО, т.е. фактическое поле ОСО в июле этого года значительно отличается по своей структуре от среднего поля ОСО. Этот результат вполне согласуется с полем средних квадратических отклонений, характеризующих изменчивость ОСО. В июле 1996 г. первая главная компонента на общем нисходящем тренде также отрицательна, однако вторая главная компонента в это время располагается на восходящей части линейного тренда, сформировавшегося после 1982 г., но имеет небольшое положительное значение. В результате, во всем рассматриваемом регионе аномалии ОСО отрицательны, а их наибольшие значения перемещаются на 70-80° ю.ш. (рис. 13б).

В летние месяцы, когда наибольший вклад в суммарную дисперсию вносит первая главная компонента (первое собственное значение), а влиянием второй и третьей главных компонент можно пренебречь, аномалии полей ОСО определялись с учетом только первой главной компоненты. Интерес представляет и тот факт, что сглаженные временные ряды во все месяцы лета (декабрь, январь, февраль) однотипны, поэтому расчеты аномалий полей ОСО проводились для центрального месяца лета – января. Соответствующие поля аномалий приводятся на рис. 14, 15.

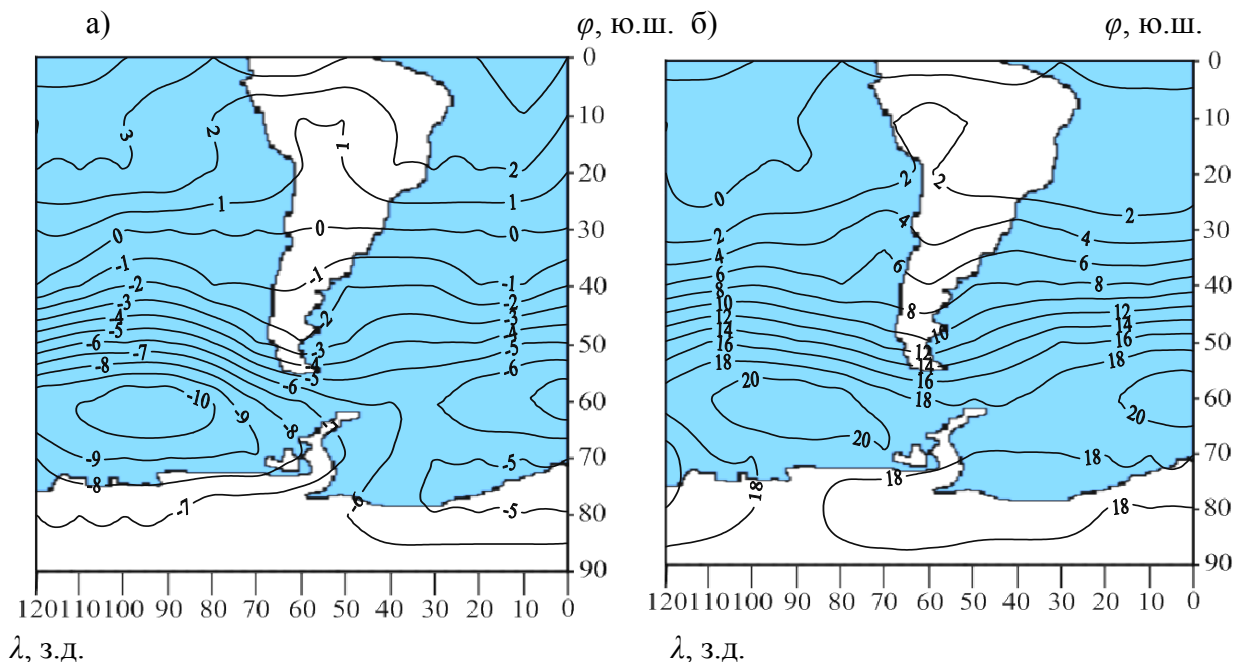


Рис. 14 – Поля аномалий ОСО в январе 1968 г. (а) и в 1979 г. (б).

В период с 1960 по 1978 год первая главная компонента находится в области отрицательных значений. В январе 1968 г., относящемся к этому периоду, поле отрицательных аномалий, как следует из рис. 14а, охватывает всю рассматриваемую область южной полярной зоны вплоть до 30-35° ю.ш. Это свидетельствует о том, что в указанные периоды времени поля ОСО имели меньший общий фон по сравнению со средними полями ОСО, а поскольку основная доля в них принадлежит стратосферному озону, то и его общая концентрация, надо полагать, была ниже, чем в более поздние годы прошлого столетия. Представляет интерес тот факт, что области наименьших



концентраций озона наблюдались над южными акваториями Тихого и Атлантического океанов, примыкающих к Антарктическому материку.

После 1978 г. до 1984 г., наблюдается быстрое возрастание первой главной компоненты и ее значения становятся положительными, что соответственно отражается на структуре полей ОСО. Как следует из рис. 14б, в январе 1979 г., располагающегося на указанном тренде быстрого роста первой главной компоненты, вся рассматриваемая западная часть южной полярной области покрыта положительными аномалиями ОСО с максимальными её значениями над Антарктидой и примыкающими акваториями Южного океана.

Похожие по структуре поля аномалий ОСО имеют место и в январе 1989 г., когда первая главная компонента также положительна, но располагается на быстро нисходящей ветви тренда (рис. 15а) и обращает на себя внимание образовавшаяся достаточно узкая зона больших меридиональных градиентов приращений ОСО. В январе 1996 г., когда на нисходящей ветви тренда в это время  $Z_1(t)$  приобретает уже значение меньше нуля, отрицательные аномалии ОСО вновь покрывают весь рассматриваемый регион, в том числе и тропическую зону (рис. 15б).

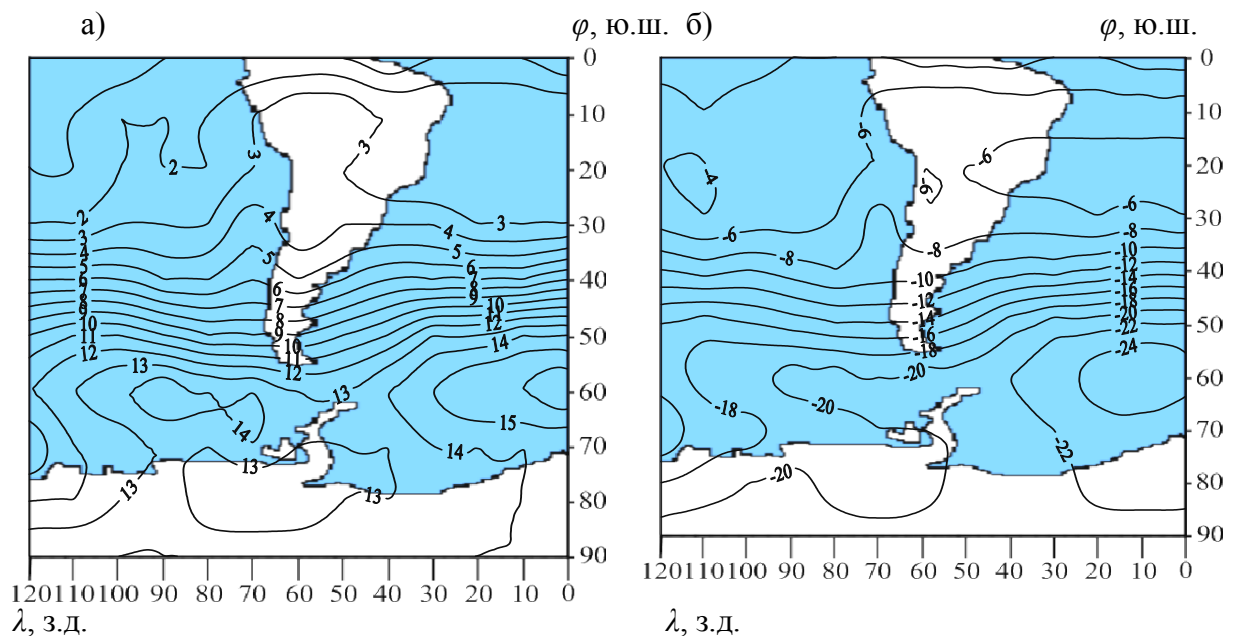


Рис. 15 – Поле аномалий ОСО в январе 1989 г. (а) и 1996 г.(б).

Для подтверждения описанной выше тенденции изменения аномалий ОСО на нисходящей ветви тренда в конце прошлого столетия приведем еще поле аномалий за декабрь 1998 г. (рис. 16).

Обобщая полученные данные о полях аномалий ОСО, можно прийти к заключению о том, что, во-первых, изменения во времени главных компонент полей ОСО хорошо отражают характер изменения во времени среднемесячных полей ОСО, и, во-вторых, в рассматриваемый период времени в западном секторе южной полярной области происходит общее уменьшение ОСО с периодическим колебанием общей концентрации озона. На это стоит обратить особое внимание, поскольку преобладающий вклад в общее содержание озона, как уже отмечалось выше, вносит стратосферный озон.

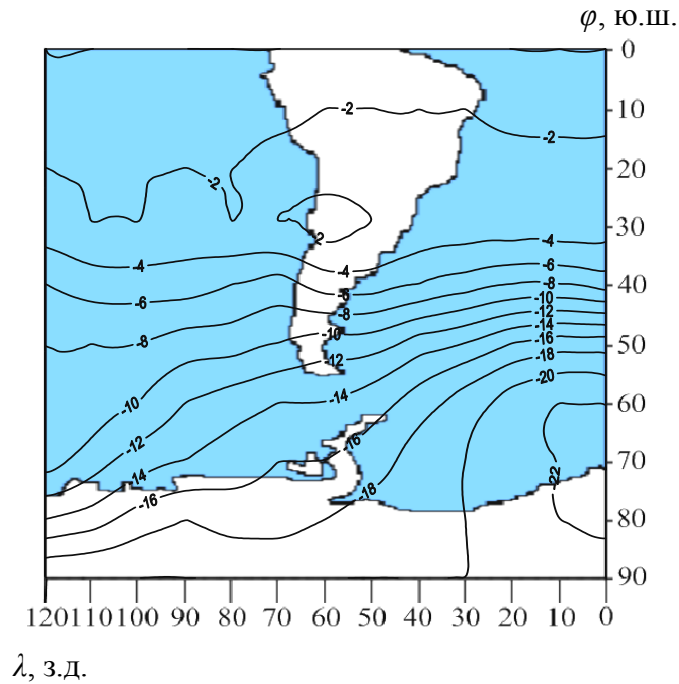


Рис. 16 – Поле аномалий ОСО (1998 г., декабрь).

**Выводы.** Компонентный анализ полей ОСО дал возможность определить, что наиболее крупномасштабные характеристики этих полей отражает первая главная компонента, а следовательно и первый собственный вектор, на долю которой приходится от 82% (в весенне-летний сезон) до 53% (в зимний период) от суммарной дисперсии полей ОСО. Вторая главная компонента даёт заметный вклад в общую структуру полей ОСО лишь с мая по август (15 – 18%), а третья главная компонента исчерпывает лишь 3 – 9% от суммарной дисперсии этих полей.

Статистический анализ временных рядов первых трёх главных компонент показал наличие в основных процессах формирования полей ОСО сезонных, полугодовых, годовых периодичностей и колебаний с большими масштабами – от 5-6 лет до квазидекадных.

Сглаживание временных рядов ОСО дало возможность установить, что в западном секторе высоких широт южного полушария происходит непрерывное уменьшение с периодическими квазидекадными колебаниями концентрации общего содержания озона, которое наблюдается во все сезоны. Этот факт подтверждается структурой полей аномалий ОСО, рассчитанных для ряда лет, относящихся к ниспадающему тренду во временных рядах первой главной компоненты полей ОСО, на которую, как указывалось выше, приходится основная доля суммарной дисперсии полей ОСО.

### Список литературы

1. *Нерушев А.Ф.* Воздействие интенсивных атмосферных вихрей на озоновый слой Земли. –Л.: Гидрометеоиздат, 2003.- 222 с.
2. *Фишер А, Штелин И.* Антарктическая озоновая дыра:1996 – 2002 гг.// Бюллетень ВМО.-2003.- Т.52, №3.- С. 316-322.
3. *Грицай А.В., Євтушевський О.М., Міліневський Г.П.* Планетарні хвилі в озоновому шарі над Антарктичним півостровом у 1999 і 2002 р. // Вісник Київського національного університету. Астрономія. – 2005. – Вип. 41 - 42. – С. 63 – 67.

4. Грицай А.В., Євтушевський О.М., Міліневський Г.П., Грицай З.І., Агапітов О.В. Довготний розподіл загального вмісту озону у крайовій області антарктичного стратосферного вихору // Космічна наука і технологія. – 2005.-Т.11, №5/6. – С. 5 – 11.
5. Грицай А.В., Євтушевський О.М. Сезонні зміни активності квазістаціонарних планетарних хвиль у стратосфері над Антарктикою // Космічна наука і технологія. – 2006.-Т. 12, №4. – С. 71 – 77
6. Школьній Є.П., Лоева І.Д., Гончарова Л.Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації: Підручник.- К.: Міносвіти України, 1999. – 600 с.
7. Бургаз А.А. Структура полів загального вмісту озону у західному секторі південної півкулі // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.-2010.- №51.-С. 131-136.

**Статистична структура полів загального вмісту озону в атмосфері західного сектора південної півкулі.**

**Школьній Є.П., Бургаз А.А., Галич Є.А.**

*Виявлені основні особливості статистичної структури полів загального вмісту озону (ЗВО) в західному секторі південної півкулі. Отримані головні компоненти цих полів. Показані особливості часової мінливості компонент ЗВО в атмосфері в другій половині ХХ сторіччя. Визначені статистично значущі приховані періодичності і трендові складові в часових рядах головних компонент.*

**Ключові слова:** загальний вміст озону, структура, поля, головні компоненти, періодичності.

**The statistical structure of total maintenance ozone fields in atmosphere of the western sector of South hemisphere.**

**Shkolniy E.P., Burgaz A.A., Galich E.A.**

*The basic features of statistical structure of the fields of total maintenance of ozone (TOM) are exposed in the western sector of the South hemisphere. The main components of these fields were obtained. They gave possibility to reveal the important processes of the TOM fields formation in an atmosphere in the second half of XX century. The statistically meaningful hidden periodicity and trend constituents in the temporal rows of main component are defined.*

**Keywords:** total maintenance of ozone, structure, fields, main components, to periodicity.