

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ВЕТРА НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ

М.В. Шокуров

Морской гидрофизический институт НАН
Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: efimov@alpha.mhi.iuf.net

На основе массива данных реанализа NCEP/NCAR предлагается метод синтеза пространственно-временной структуры поля приводного ветра над Черным морем, основанный на разложении полей на детерминированную и случайную компоненты. Случайная компонента, описывающая структуру поля ветра в диапазоне временных масштабов от синоптического до межгодового, воспроизводится пространственно-временным генератором, возбуждаемым заданным случайным шумом.

Введение

Важнейшим фактором, определяющим циркуляцию в почти замкнутом Черном море, является поле ветра. Как показывают оценки [1,2], сезонная изменчивость течений и, в частности, Основного черноморского течения, связана с сезонной изменчивостью поля завихренности ветра над морем. Физические механизмы такой изменчивости поля завихренности приводного ветра рассмотрены в работе [3].

Оценки вклада напряжения ветра в генерацию течений в Черном море, а также результаты расчетов ветровой циркуляции в море значительно различаются между собой (например [4,5,6]). Отсутствие единой точки зрения в первую очередь можно объяснить субъективным заданием пространственной структуры поля ветра над морем и его изменчивости в широком диапазоне временных масштабов. Существующие атласы полей ветра не вполне отвечают этим целям, поскольку характеризуют распределение среднемесячных характеристик скорости, таких как модуль и направление ветра. Поэтому они могут быть использованы лишь при расчете сезонной изменчивости течений, хотя даже для этого случая они не позволяют адекватно описать основной фактор, формирующий ветровую циркуляцию в замкнутом море на сезонных временных масштабах, – завихренность поля ветра. Вторым недостатком атласов ветра является отсутствие описания региональной изменчивости поля ветра в синоптическом, внутрисезонном, межсезонном и межгодовом временных интервалах.

Целью настоящей работы является детальное описание пространственно-временной структуры поля ветра над Черным морем в ши-

роком диапазоне временных масштабов и построение для него компактного стохастического генератора для потенциального использования в численных моделях циркуляции моря, а также для расчета режимных характеристик ветровых волн. Современные массивы данных предоставляют такую возможность.

Данные

В работе были использованы данные реанализа NCEP/NCAR [7] по скорости ветра на уровне 10м, относящиеся к 40-летнему периоду 1958-1997гг. для региона Черного моря 40.952°+46.666° с.ш., 28.125°+41.25° в.д. с шагом по широте 1.905° и по долготе 1.875° (8×4=32 точки). Дискретность по времени составляет 6 часов.

Метод анализа и синтеза

Целью работы является анализ пространственно-временной структуры поля ветра в регионе и построение стохастического генератора синтетического поля ветра, обладающего такими же статистическими свойствами. В этом разделе приводится схематичное описание метода, результаты и выбор параметров обсуждаются в следующих разделах.

Первым шагом анализа является выделение детерминированной составляющей изменчивости поля скорости ветра – сезонного цикла. Методом гармонического анализа по исходным данным зональной и меридиональной компонент скорости ветра определяются среднегодовые значения и амплитуды и фазы первых N_h гармоник сезонного цикла:

$$U(\mathbf{x}, t) = U_0(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^{N_h} U_k(\mathbf{x}) \sin(k\omega t + \varphi_k(\mathbf{x})),$$
$$V(\mathbf{x}, t) = V_0(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^{N_h} V_k(\mathbf{x}) \sin(k\omega t + \psi_k(\mathbf{x})) \quad (1)$$

где ω – годовая частота. После вычитания годового хода из исходных данных оставшиеся аномалии скорости ветра описывают недетерминированные случайные составляющие от синоптического временного масштаба до межгодового.

Для описания пространственно-временной структуры случайных составляющих скорости ветра рассматривается разложение аномалий скорости ветра за полный промежуток времени 1958-1997гг. в ряд по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ):

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sigma_0 \sum_{i=1}^n \sigma_i \mathbf{f}_i(\mathbf{x}) g_i(t) \quad (2)$$

где $\mathbf{f}_i(\mathbf{x})$ есть векторные поля ЭОФ, $g_i(t)$ – их главные компоненты, $n=4 \times 8 \times 2=64$. Для удобства полное размерное среднеквадратичное отклонение σ_0 вынесено за знак суммы, так что

σ_i^2 — относительные дисперсии ЭОФ.

$$\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 = 1. \text{ Оба набора функций } f_i(x) \text{ и } g_i(t)$$

ортонормированы. Для дальнейшего анализа будут использоваться только первые N_{EOF} ЭОФ, описывающие достаточную долю дисперсии аномалий скорости.

Третьим шагом является построение многомерной регрессии для главных компонент ЭОФ-разложения. Уравнение регрессии имеет вид

$$g_i(t) = \sum_{t'=1}^{N_n} \sum_{i=1}^{N_{EOF}} a_{ij}(t') g_j(t-t') + \xi_i(t) \quad (3)$$

где $a_{ij}(t')$ — матрицы коэффициентов регрессии с различными сдвигами t' , $\xi_i(t)$ — набор независимых случайных процессов, имеющих вид белого шума с неизвестной пока дисперсией. Такая модель предназначена для учета взаимной коррелированности главных компонент при ненулевых временных сдвигах. Оценивание параметров модели $a_{ij}(t')$ выполняется стандартным методом наименьших квадратов или с помощью рекурсивного алгоритма Левинсона-Берга. Критерием выбора числа сдвигов (порядка модели) N_n является поведение матрицы дисперсии остаточного шума $Q_{ij} = \langle \xi_i(t) \xi_j(t) \rangle$. Конкретно будет использоваться взвешенная с весами относительных дисперсий главных компонент σ_i^2 полная дисперсия шума

$$Q = \sum_{i=1}^{N_{EOF}} Q_{ii} \sigma_i^2, \text{ характеризующая относитель-$$

ную долю дисперсии исходного поля аномалий скорости ветра, не описываемую моделью авторегрессии (3).

Наконец последним шагом анализа является определение параметров амплитудной модуляции компонент остаточного шума $\xi_i(t)$ годовым ходом. Методом гармонического анализа определяются среднегодовые значения и амплитуды и фазы первых N_n гармоник сезонного цикла среднеквадратичного отклонения каждой компоненты остаточного шума

$$A_i(t) = A_{0i} + \sum_{k=1}^{N_n} A_{ki} \sin(k\omega t + \varphi_{ki}), \quad (4)$$

где ω — годовая частота. В результате компоненты демодулированного шума $\zeta_i(t) = \xi_i(t)/A_i(t)$ являются нормальными белозумовыми процессами с нулевым средним и единичной дисперсией.

Синтез поля скорости ветра заключается в выполнении рассмотренных выше шагов анализа в обратном порядке. Задаем N_{EOF} генераторов нормального белого шума с единичной дисперсией $\zeta_i(t)$, получаем из них с помощью (4) модулированный шум $\xi_i(t) = A_i(t) \zeta_i(t)$. Далее с

помощью уравнения регрессии (3) порядка N_n и матриц $a_{ij}(t')$ вычисляем временные ряды главных компонент $g_i(t)$ требуемой длины, выбирая произвольные начальные значения $g_i(0)$ и отбрасывая начальный переходной процесс длиной несколько суток. Наконец по формуле (2), используя веторные поля ЭОФ $f_i(x)$, получаем случайные аномалии поля скорости в физическом пространстве и добавляем к ним детерминированные компоненты годового хода (1).

Сезонный цикл

На рис.1 приведены средние за 1958-1997гг. поля скорости ветра для шести месяцев года. Основные особенности сезонного цикла состоят в следующем. В целом над морем в течение всего года преобладают северные ветры со скоростью около 2-3м/с, достигающие максимума 4м/с летом. В восточной части моря в зимний период возникает циклоническая структура поля ветра с максимальной завихренностью 1×10^{-5} 1/с. В октябре центр этого циклона находится на крайнем юго-востоке, к январю он перемещается на северо-запад к Керченскому проливу и к апрелю возвращается в исходное положение. Циклоническая завихренность на самом востоке региона сохраняется и летом. В западной части моря наоборот существует антициклоническая структура с завихренностью -1×10^{-5} 1/с, которая усиливается к лету и распространяется на все море, вытесняя циклон на крайний восток. Антициклоническая завихренность на самом западе региона сохраняется в течение всего года, и зимой.

При выборе числа гармоник мы использовали следующую грубую оценку значимости амплитуд гармоник. Среднее по региону для обеих компонент скорости среднеквадратичное отклонение составляет $\sigma_0 = 3.4$ м/с. Исходя из числа синоптических степеней свободы $N = 365 \times 40 / 2 = 7300$, где 2 суток — синоптический масштаб (время затухания корреляционной функции), получаем ошибку оценки амплитуды $\sigma_0 / N^{1/2} = 0.04$ м/с. Анализ показывает, что амплитуды первых трех гармоник обеих компонент скорости практически для всех точек региона превышают это значение.

Эмпирические ортогональные функции

Результаты ЭОФ-разложения (2) аномалий скорости ветра для полного массива 1958-1997гг., первые шесть ЭОФ $f_i(x)$ и их относительные дисперсии σ_i^2 в % от полной дисперсии аномалий скорости, приведены на рис.2.

Пространственная структура ЭОФ имеет достаточно наглядную физико-географическую интерпретацию. Первые две ЭОФ описывают крупномасштабные аномалии поля ветра, практически постоянные в рассматриваемом регио-

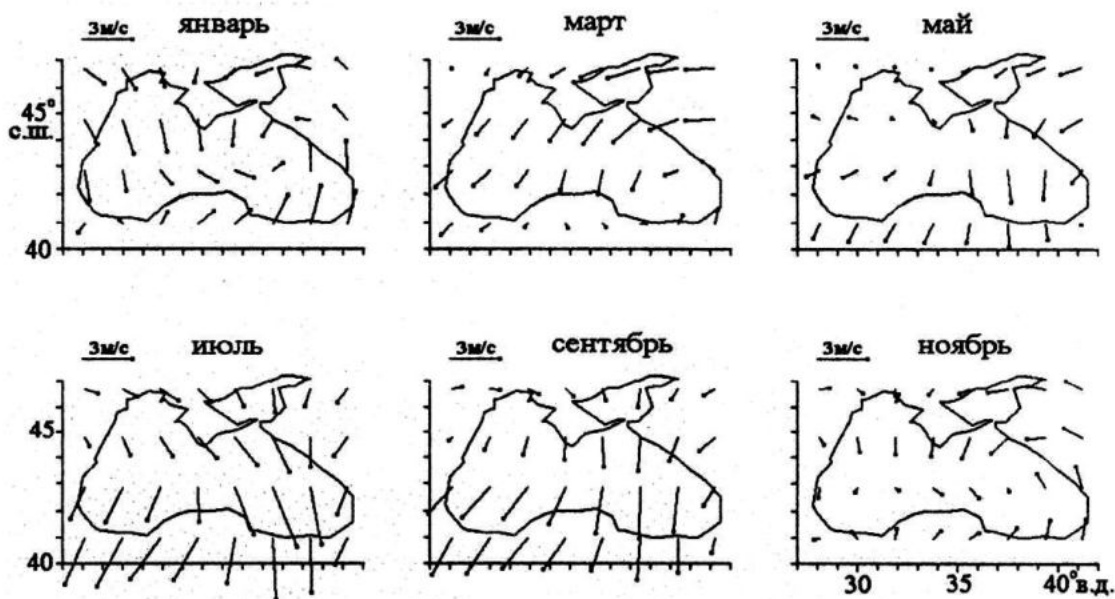


Рис.1. Годовой ход поля скорости ветра над Черным морем, представленный в виде среднемесячных карт для шести месяцев.

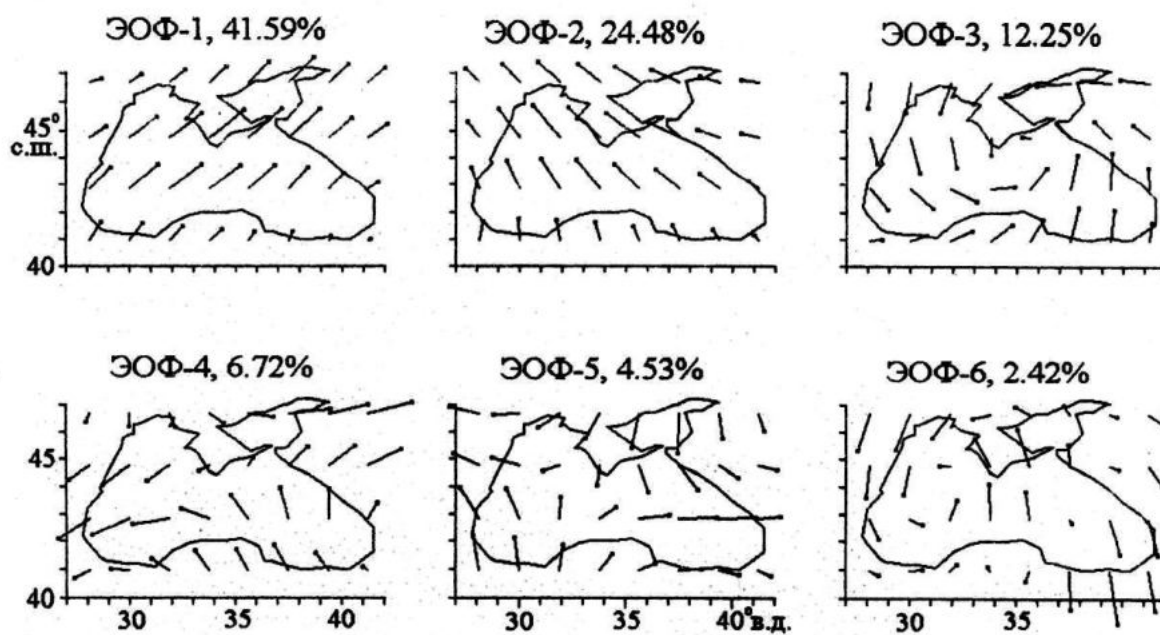


Рис.2. Эмпирические ортогональные функции поля скорости ветра $f_i(x)$ и их относительные дисперсии σ_i^2 в %, $i=1, \dots, 6$.

не. Первая ЭОФ описывает северо-восточные (юго-западные) ветры с небольшими завихренностями противоположного знака в северо-западном и юго-восточном углах региона. Вторая ЭОФ описывает почти перпендикулярные к ветрам первой ЭОФ северо-западные (юго-восточные) ветры с завихренностями разного знака в северо-восточном и юго-западном углах региона. Третья ЭОФ представляет собой характерный компактный синоптический циклон (антициклон) с дивергенцией (конвергенцией), локализованный в центре моря. Следующие две ЭОФ являются седлами, описывающими вихревые квадруполи с различным расположением вихрей, при этом центры вихрей находятся за пределами региона. Наконец, шестая ЭОФ представляет собой зонально ориентированный вихревой диполь, состоящий из меньших вихрей разного знака.

Заметим, что подобные конфигурации ЭОФ произвольного двумерного векторного поля с достаточно большим пространственным радиусом корреляции для небольшого пространственного региона должны быть достаточно типичны. Действительно, если разложить векторное поле на плоскости в малой окрестности точки в ряд Тейлора и ограничиться линейными членами, то векторное поле будет описываться шестью числами – двумя компонентами средней скорости и четырьмя компонентами тензора скорости деформации. Если теперь считать, что каждое из этих чисел является случайной величиной, то полученное случайное поле будет описываться шестью ЭОФ, конфигурация которых будет определяться соотношениями между указанными коэффициентами разложения ряда Тейлора. Первые пять ЭОФ для Черного моря с хорошей точностью являются линейными комбинациями различных членов разложения в ряд Тейлора. Первые две – это просто постоянные почти перпендикулярные векторы скорости, третья – вихрь со слабой дивергенцией (конвергенцией) – комбинация линейных членов. Четвертая и пятая ЭОФ – седла с разной ориентацией – также могут быть построены из линейных членов.

В данной работе ЭОФ-разложение используется просто как удобный базис в пространстве состояний, оптимальный для описания синоптической и более низкочастотной изменчивости скорости ветра минимальными средствами. ЭОФ-моды поля скорости для небольшого региона не являются динамическими модами и статистическая значимость каждой из них не имеет значения. Наиболее подходящим критерием выбора числа мод в таком случае является суммарная доля дисперсии. Представленные шесть ЭОФ описывают в сумме 92% дисперсии поля скорости ветра, оставшиеся 8% описывают мелкокомасштабные особенности конкретных синоптических

ситуаций, которыми мы пренебрегаем в целях сокращения дальнейшего анализа.

Еще одним важным вопросом является возможная сезонная изменчивость самой формы ЭОФ. В этом случае более оптимальным было бы использование отдельных ЭОФ-разложений для разных сезонов. Результаты ЭОФ-разложения поля скорости отдельно для каждого месяца года показывают, что пространственные формы ЭОФ практически не меняются. Это дает основание использовать общий среднегодовой базис ЭОФ как оптимальный для дальнейшего анализа.

Регрессионная модель

Следующим шагом является статистический анализ главных компонент $g_i(t)$ во временной области. Исходные аномалии скорости, а также их главные компоненты имеют типичный для многих метеополей красношумовой спектр без выделенных пиков. Кроме того, анализ взаимных корреляционных матриц главных компонент для разных временных сдвигов свидетельствует о наличии в них значимых корреляций. Такие корреляции для поля ветра над Черным морем связаны с тем, что синоптические возмущения имеют характерное время корреляции и характерное пространственно-временное поведение – преимущественное направление распространения (на восток). Наиболее простой и естественной моделью для описания данных с перечисленными выше свойствами является многомерная авторегрессия (3) с неизвестным заранее числом учитываемых временных сдвигов N_a . Подобного рода модели использовались ранее для изучения колебаний Эль-Ниньо – Южного колебания под названием POP (Principal Oscillation Patterns) [9]. Критерием выбора числа сдвигов (порядка модели) является поведение взвешенной дисперсии остаточного шума

$$Q = \sum_{i=1}^{N_{EOF}} \langle \xi_i(t) \xi_i(t) \rangle, \sigma_i^2. \text{ Эта величина в зависимости}$$

от порядка модели N_a ведет себя следующим образом. Учет уже одного сдвига позволяет описать преобладающую долю дисперсии, дальнейшее увеличение порядка модели уменьшает остаточную дисперсию незначительно. Это свидетельствует в пользу простого выбора $N_a=1$ (6 часов) для окончательной модели: учет временной задержки в 6 часов в многомерном представлении (3) позволяет учесть фазовые сдвиги между спектральными составляющими главных компонент $g_i(t)$ и описать эволюцию во времени исходного случайного поля скорости.

Результирующая матрица коэффициентов регрессии $a_{ij}(1)$ приведена в табл.1. Комплексно-сопряженные пары собственных значений этой матрицы имеют вид $e^{(-1 \pm i 2\pi/T)\Delta t}$, где $\Delta t=6$ часов, T и T есть соответственно время затухания и пери-

Табл.1. Матрица авторегрессии $a_{ij}(1)$, $i,j=1,\dots,6$; формула (3).

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6
1	0.9342	0.0195	-0.0495	-0.1001	-0.0264	-0.0206
2	-0.0378	0.8756	-0.2062	-0.0178	0.1234	0.0082
3	0.0069	0.1295	0.7709	-0.0118	-0.0806	0.1229
4	0.0957	-0.0713	-0.1055	0.8023	-0.0061	0.1090
5	0.0088	-0.1050	0.0349	0.0025	0.7445	-0.0324
6	0.0084	0.0027	0.0122	-0.0503	0.1601	0.7035

од колебаний, соответствующая пара собственных векторов показывает поля скорости, находящиеся в квадратуре в процессе колебаний. Действительные собственные значения $e^{-\Delta t/\tau}$ соответствуют затухающим с характерным временем τ неколебательным процессам.

Матрица из табл.1 имеет пару собственных значений с $\tau=29.4$ часа и $T=155.3$ часа \approx 6 суток, что характерно для типичного синоптического процесса. Соответствующие собственные вектора состоят в основном из 3-5 ЭОФ и описывают перемещение циклона на восток и замену его антициклоном через $T/2 \approx 3$ суток. Еще одна пара собственных значений имеет $\tau=40.1$ часа и $T=283.3$ часа ≈ 12 суток, собственные вектора состоят из 1-2 ЭОФ, описывая низкочастотные крупномасштабные процессы. Два оставшихся собственных значения являются действительными с $\tau=36.4$ часа и $\tau=16.4$ часа. Таким образом, рассмотренные детерминированные переходные процессы матрицы $a_{ij}(1)$, запускаемые шумом в случайной последовательности со случайными амплитудами в стохастическом уравнении (3), описывают перемещающиеся случайные возмущения в поле ветра.

Последним шагом анализа является демодуляция остаточного шума (4) с числом гармоник $N_n=3$.

Синтез

После завершения анализа синтез выполняется в обратной последовательности, как описано в разделе 3. На рис.3 приведено сравнение спектров одной из компонент скорости ветра в произвольно выбранной точке Черного моря для исходных данных и синтезированных согласно описанной методике. Видно, что расхождение между ними мало, оно заключается лишь в наличии слабого, но отчетливо выраженного высокочастотного суточного пика в реальных данных, связанного с бризовой циркуляцией в летний сезон. Синтезированные данные не воспроизводят этой особенности. Интересно также отметить, что синтезированный ветер имеет почти правильный уровень спектральной плотности на низких (межгодовых) частотах. Информация о

межгодовой изменчивости при построении генератора извлекается только из матрицы корреляции главных компонент со сдвигом 6 часов, и поэтому по построению синтезированный ветер не должен правильно воспроизводить межгодовую изменчивость в целом по региону. Для этих целей необходимо отдельно анализировать моды межгодовой изменчивости и их взаимные корреляции при больших временных сдвигах.

Обсуждение

В этом разделе обсуждаются другие возможные варианты анализа и синтеза.

Сезонная модуляция амплитуды синоптических возмущений является типичным явлением в средних широтах, в том числе и над Черным морем. Ее можно было бы устранить в самом начале путем демодуляции каждой компоненты скорости в каждой точке региона, однако это привело бы в ущерб компактности к существенному увеличению количества параметров генератора. Второй вариант – демодуляция главных компонент – также невыгоден, поскольку при этом главные компоненты теряют свойство ортогональности при нулевом сдвиге, что усложняет задачу оценивания коэффициентов регрессии. Таким образом, использованная нами демодуляция остаточного шума представляется наиболее простым и компактным вариантом.

Для построения многомерной регрессии можно было бы использовать исходные аномалии скорости или их проекцию на какой-нибудь набор пространственных мод, например пространственных Фурье-гармоник. Все эти варианты проигрывают в компактности ЭОФ-разложению из-за его свойства оптимальности описания дисперсии изменчивости.

Свойство пространственно-временной структуры поля ветра над Черным морем, заключающееся в распространении синоптических возмущений на восток, хорошо видно при непосредственном просмотре исходных данных. При построении многомерной регрессии главных компонент это свойство оказывается зашифрованным в матрице коэффициентов регрессии (табл.1). Наиболее же отчетливо оно проявляется

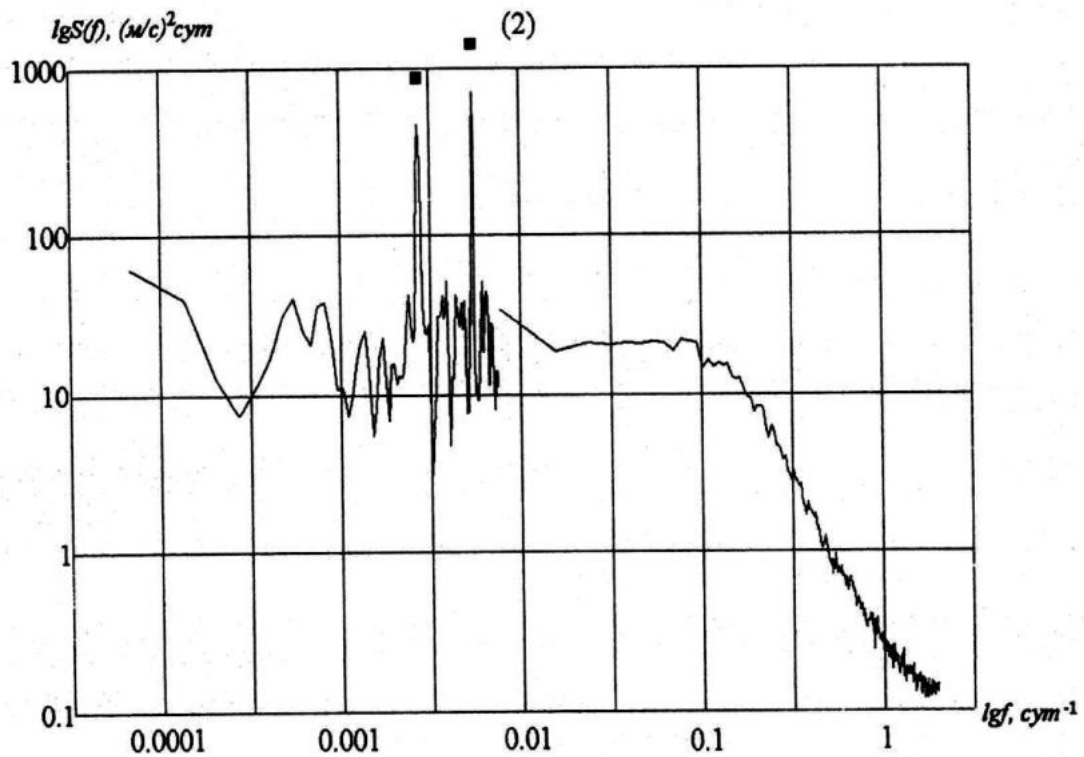
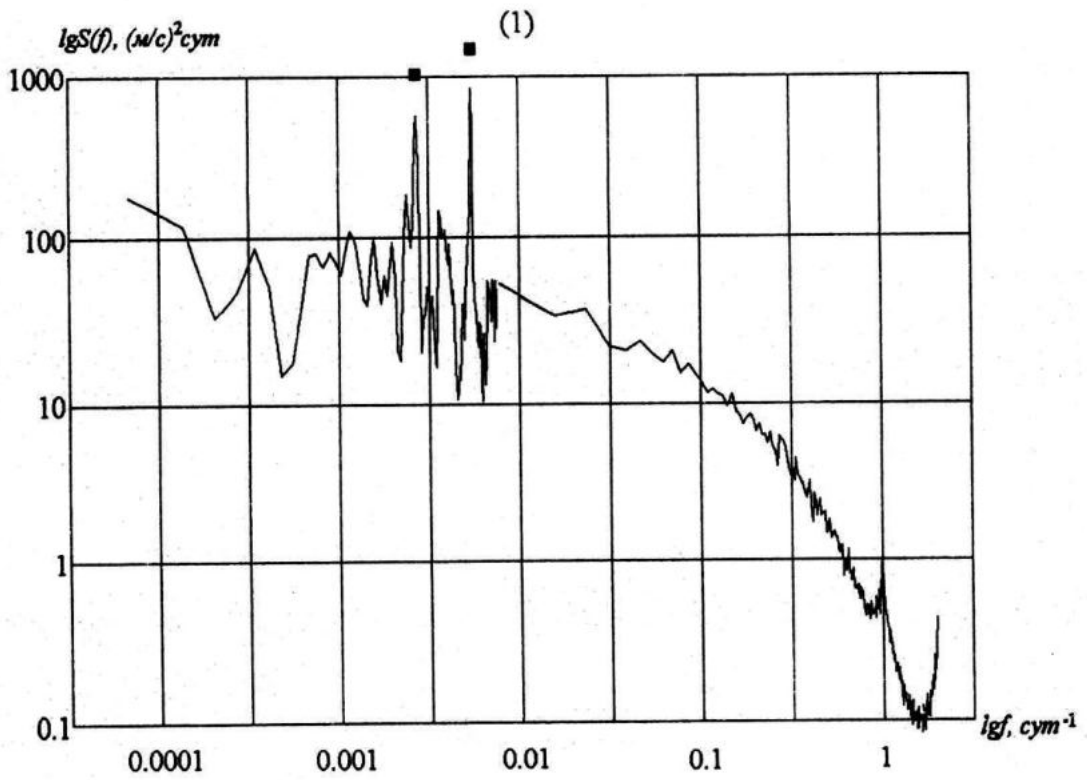


Рис.3. Спектры зональной компоненты скорости в точке 28.125°в.д., 46.666°с.ш. для реальных (1) и синтезированных (2) данных. В диапазоне 40 лет+4 месяца спектральная плотность сглажена 3-точечным фильтром (1/4,1/2,1/4). Несглаженные значения спектра для годовой и полугодовой гармоник отмечены квадратами. В диапазоне 128 суток+6 часов спектральная плотность оценивалась как средняя по последовательным отрезкам ряда длиной 128 суток.

при построении расширенного разложения по ЭОФ (Extended EOF [8], альтернативное название метода – сингулярный спектральный анализ), при котором для описания текущего состояния системы учитывается также ее состояние в предыдущие моменты времени. Каждая расширенная ЭОФ представляет собой последовательность состояний системы за конечный промежуток времени, называемый шириной окна. Не приводя примеры, укажем, что результат такого разложения по расширенным ЭОФ демонстрирует в целом восточное распространение синоптических возмущений, при этом расширенная ЭОФ на своих разных стадиях проходит через различные комбинации обычных ЭОФ. Для достаточно большой ширины окна расширенная ЭОФ может демонстрировать прохождение через регион нескольких циклонов и антициклонов, чередующихся с седлами (4-ая и 5-ая обычные ЭОФ) и постоянными ветрами (1-ая и 2-ая обычные ЭОФ). Основным недостатком метода расширенных ЭОФ для синтеза поля ветра является его громоздкость по сравнению с используемой нами многомерной регрессией главных компонент.

Заключение

Предлагаемый метод анализа и синтеза поля ветра над Черным морем позволяет воспроизводить поле ветра, обладающее основными статистическими свойствами реального ветра, для произвольно большого промежутка времени при малых затратах по сравнению с моделями атмосферной циркуляции. В частности предлагаемый метод синтеза воспроизводит сезонные изменения компонент скорости ветра по всей акватории моря, а также пространственно-временную структуру случайных колебаний компонент скорости ветра в межгодовом, межсезонном, внутрисезонном и синоптическом диапазонах временных масштабов. Синтез структуры поля ветра может служить для целей расчета изменчивости ветровых течений в море в указанном выше широком диапазоне периодов от межгодовых до синоптических. Он может также служить входной

информацией для численных климатических расчетов ветро-волновых полей в Черном море с использованием современных численных моделей ветровых волн. Предлагаемая методика может быть использована также для других районов Мирового океана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков С.Н., Коротаев Г.К., Уайтхед Дж.А., 1996. Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Части 1,2. *Изв. РАН, ФАО*, 32, N4, С548-564.
2. Korotaev G.K., Oguz T., Ozsoy E., 2000. Predictability of the Black Sea annual and interannual variability. Report on the Workshop and Project Evaluation Meeting 'Black Sea Ecosystem Processes and Forecasting/ Operational Database Management System', Istanbul, 15-16 May, 2000.
3. Ефимов В.В., Шокуров М.В., 2001. Физические механизмы генерации ветровой циркуляции Черного и Каспийского морей. *Изв. РАН, ФАО*, сдано в печать.
4. Москаленко Л.В., 1975. Численный расчет стационарной циркуляции в Черном море по типовым полям ветра. *Метеорология и гидрология*, N1, С58-65.
5. Горбунов А.Е., 1986. Моделирование циркуляции Черного моря. *Изв. АН СССР, ФАО*, 22, N9, С997-1002.
6. Булгаков С.Н., Коротаев Г.К., 1987. Диагностический расчет климатической циркуляции черноморских вод на основе полной нелинейной модели. *Морской гидрофизический журнал*, N1, С7-14.
7. Kalnay E. and Coauthors, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, С437-471.
8. N. Graham, J. Michaelson, 1987. An investigation of the ENSO with statistical models. *J. Geophys. Res.*, 92, NC3, С14251-14271.
9. J.-S. Xu, H. von Storch, 1990. Predicting the state of the Southern Oscillation using Principal Oscillation Patterns analysis. *J. Climate*, 3, N12, С1316-1329.