

**ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-  
ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ  
СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА «А»  
В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ  
ЧЕРНОГО МОРЯ ПО  
СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

*Е. Ф. Васечкина*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: cpdi@rambler.ru

*По суточным данным о содержании хлорофилла «а» в поверхностном слое Черного моря вычислены вейвлет-спектры поля на нескольких зональных и меридиональных разрезах. Исследовались временные развертки спектра в разных точках моря (при фиксации пространственной координаты), а также пространственно-временная динамика поля на разных пространственных масштабах.*

**Введение.** Мезомасштабные водные структуры, такие как волны, вихри, ринги и меандры течений, оказывают огромное влияние на перераспределение многих гидрологических и биологических параметров водных масс. Захваченные вихрями воды с повышенным содержанием, например, хлорофилла «а» заметно выделяются на снимках поверхности моря, следовательно, с помощью спутникового дистанционного зондирования по последовательности изображений обширных акваторий моря можно изучать эволюцию гидродинамических структур, например [1 – 4]. В данном исследовании использовались данные с апреля 2007 года по октябрь 2011 года спутникового сканера MODIS, обработанные и пересчитанные в концентрацию хлорофилла «а» в поверхностном слое Черного моря [5]. Имеющиеся на снимках пропуски, обусловленные наличием облаков, заполнялись путем применения методики, подробно изложенной в [6]. Метод основывался на использовании разложения по системе эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), построенных для ансамбля реализаций двумерных полей искомым характери-

стики. Коэффициенты разложения рассчитывались методом наименьших квадратов либо с использованием генетического алгоритма поиска.

Пространственно-временная изменчивость поля хлорофилла «а» исследовалась с помощью вейвлет-анализа, эффективность применения которого для решения подобных задач показана в [7].

**Вейвлет-анализ.** Реконструированные поля с пространственным разрешением 7 км и шагом по времени 1 сутки использовались для расчетов вейвлет-спектров. Было выбрано несколько пространственных сечений массива данных: три зональных разреза с координатами 42° 20' с. ш., 43° 10' с. ш., 44° 15' с. ш. (далее упоминаются без указания минут) и два меридиональных: вдоль 31° и 37° в. д. Профили поля хлорофилла «а» вдоль этих разрезов  $F(x, t)$  исследовались с помощью вейвлет-анализа. Выполнялось вейвлет-преобразование данных пространственного сечения поля в каждый момент времени

$$W(a, b, t) = \int_S F(x, t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad (1)$$

где  $\psi$  – функция вейвлета (использовался биортогональный вейвлет);  $a$  – пространственный масштаб;  $b$  – локализация соответствующей компоненты в пространстве;  $t$  – время. Распределение абсолютных значений амплитуд  $W(a, b, t)$  в пространстве – времени содержит информацию об эволюции относительного вклада компонент разного масштаба в изменчивость изучаемого поля.

Методика реконструкции с использованием интерполяции во времени позволяет формально получать поля измеряемых со спутника характеристик в любой момент времени с заданной дискретностью. Однако, если промежуток между непустыми реализациями составляет больше 1 – 2 суток, поля, построенные с помощью временной интерполяции, вносят заметные искажения в вейвлет-спектры (на развертках спектров эти участки выделяются из общей картины малой изменчивостью коэффициентов). В связи с этим мы ограничились

исследованием только тех участков временного ряда данных, где интерполяция во времени не вносила существенных искажений. Хорошо обеспеченные области данных приходятся на период с апреля по октябрь, именно эти участки и были использованы в настоящей работе.

Визуальный анализ трехмерного массива (1) позволяет заключить, что наибольший вклад в дисперсию поля вносят

колебания в интервале масштабов 100 – 170 км, хотя периодически наблюдаются и более мелкомасштабные структуры порядка 50 км. На рис. 1 представлена временная развертка динамики коэффициентов вейвлет-спектра на масштабе 100 км вдоль выбранных пяти сечений в 2010 г.

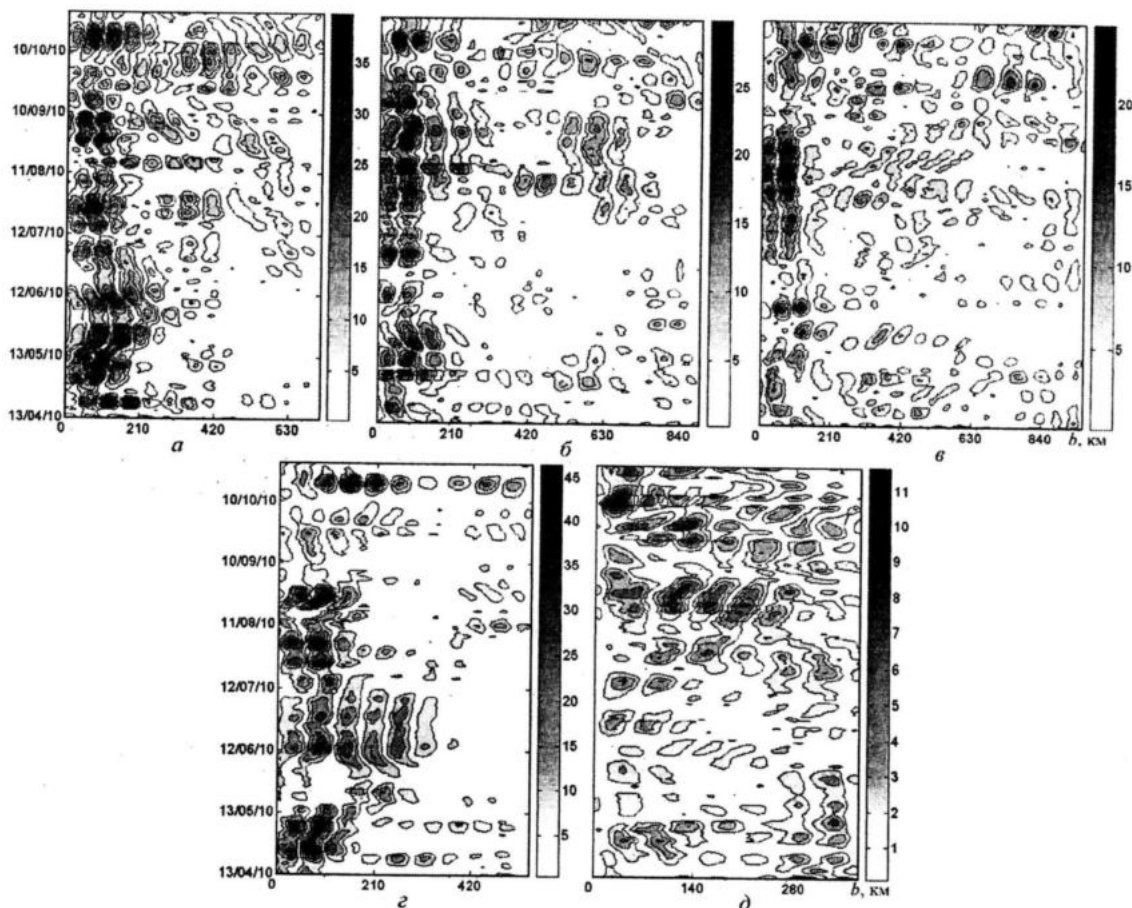


Рис. 1. Динамика абсолютных значений коэффициентов пространственных вейвлет-спектров вдоль сечений по: а – 42° с. ш., б – 43° с. ш., в – 44° с. ш., г – 31° в. д., д – 37° в. д. Направление зональных разрезов – с запада на восток, меридиональных – с севера на юг. Масштаб 100 км, 2010 г.

Аналогичные графики были построены для других лет, они, в целом, похожи, хотя и отличаются по интенсивности вихреволновых процессов, обуславливающей значения амплитуд вейвлет-коэффициентов. Анализируя эти диаграммы, можно сделать ряд выводов.

1. Интенсивность вихреволновых процессов в западной части Черного моря заметно выше, чем в восточной, и возрастает начиная со второй половины августа на всех сечениях.

2. В 200-километровой зоне вблизи западного берега Черного моря практически постоянно наблюдаются вихри с масштабом 100 – 150 км.

3. Вдоль разреза по 42 с.ш. наблюдается перенос особенностей с востока на запад, а вдоль разреза по 44 с.ш. – с запада на восток. Очевидно, данные особенности обуславливаются мендированием ОЧТ, но интенсивность этих колебаний, как правило, ниже, чем в западной области.

4. Максимальные значения амплитуд вейвлет-спектров наблюдается в северо-западной части Черного моря.

5. Вихреволновые процессы, обуславливающие особенности поля хлорофилла «а», аperiodически интенсифицируются, что находит отражение во временной изменчивости пространственно-го вейвлет-спектра.

6. В центральной части Черного моря интенсивность вихреволновых процессов не ниже, чем в зоне ОЧТ.

С целью исследования временных масштабов выявленных особенностей поля хлорофилла «а» было выполнено осреднение вейвлет-спектров вдоль оси  $b$ , т. е. рассчитаны средние значения амплитуд на каждом из разрезов

$$M(a, t) = \frac{1}{S} \int W(a, b, t) db. \quad (2)$$

При этом зональные разрезы делились пополам, поскольку интенсивности процессов в западной и восточной областях существенно различаются. В результате для каждого из зональных раз-

резов были получены массивы средних амплитуд  $M_e(a, t)$  и  $M_w(a, t)$ , из которых были выбраны вектора  $m_e(a_k, t)$  и  $m_w(a_k, t)$ , соответствующие масштабам 100 – 150 км. Каждый вектор содержал информацию об изменении интенсивности колебаний данного масштаба во времени вдоль соответствующего пространственного разреза. Далее выполнялось вейвлет-преобразование этих векторов:

$$W_k(\tau, h) = \int_T m(a_k, t) \frac{1}{\sqrt{\tau}} \psi\left(\frac{t-h}{\tau}\right) dt, \quad (3)$$

где  $\tau$  – временной масштаб;  $h$  – временная координата спектра. Перед вычислением спектра из данных вычиталось скользящее среднее с периодом, равным половине длины ряда. Анализ вейвлет-спектров дает возможность определить не только временные масштабы колебаний, но и их локализацию во времени. На рис. 2 представлены вейвлет-спектры векторов  $m_e(a_k, t)$  и  $m_w(a_k, t)$ , на масштабе  $a_k = 100$  км для трех зональных разрезов.

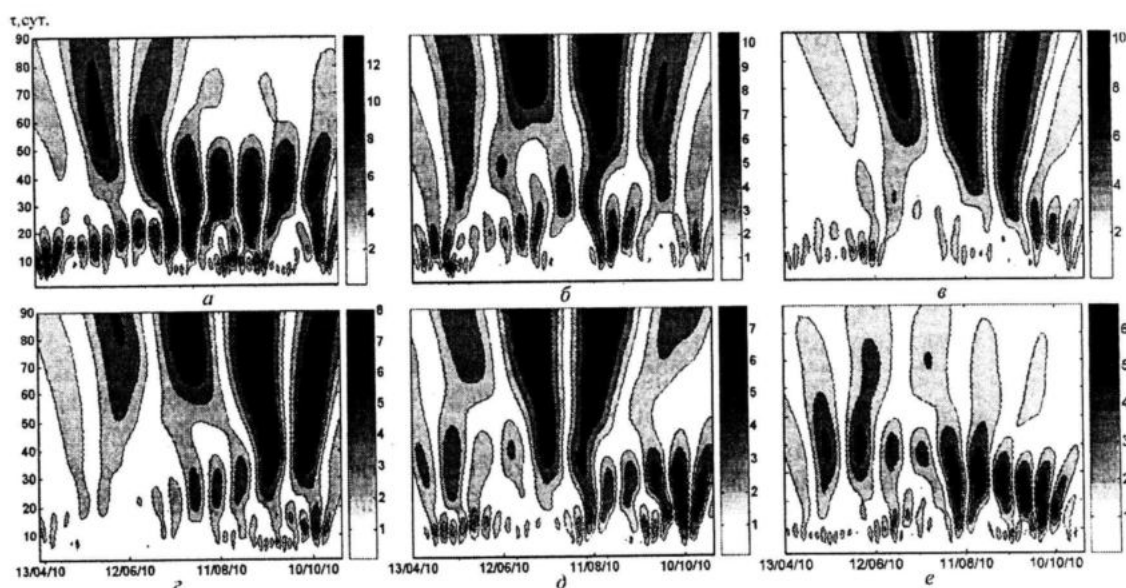


Рис. 2. Вейвлет-спектры временных рядов средних вейвлет-амплитуд изменчивости поля хлорофилла «а» на масштабе 100 км в западной (а, б, в) и восточной (z, d, e) частях Черного моря, построенные по данным вдоль разрезов по 42° с. ш. (а, z), 43° с. ш. (б, d) и 44° с. ш. (в, e). 2010 г.

Анализируя графики, подобные приведенным выше, для разных лет, можно выделить несколько энергонесущих периодов:

- 10 суток – масштаб атмосферной синоптической изменчивости;
  - 20 – 30 суток – лунный цикл;
  - 60 – 80 суток.
- Существует и более долгопериодная

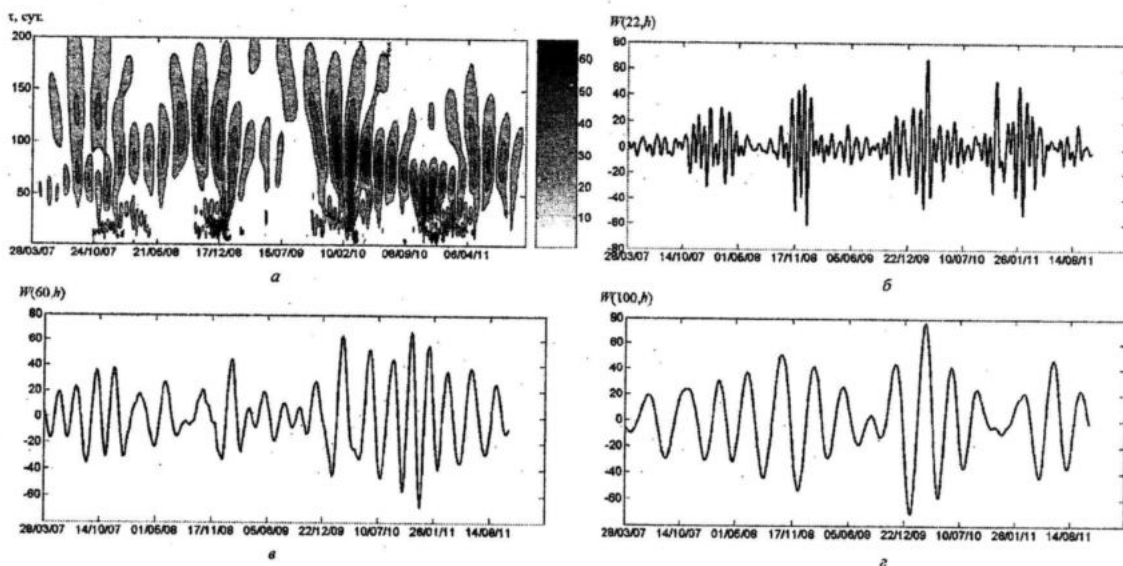
изменчивость, удаленная из данных путем вычитания скользящего среднего, поскольку по имеющимся ограниченным временным рядам судить о ней не представляется возможным. На приведенных диаграммах видно, что временная изменчивость поля характеризуется аперiodической интенсификацией процессов. Короткопериодные колебания с периодом порядка 10 суток время от времени усиливаются. Длительность такой интенсификации – от недели до месяца, а временной промежуток между последовательными событиями может меняться от 30 до 80 суток. Эти аперiodические усиления и обуславливают масштабы 20 – 30 и 60 – 80 суток, выделенные вейвлет-преобразованием.

Перейдем теперь к исследованию временной изменчивости поля хлорофилла «а», фиксируя координату  $b$  в вейвлет-спектре  $W(a, b, t)$ . Рассмотрим несколько характерных областей: СЗШ, ЮБК, придунайская область, центральные области западной и восточной частей моря, область вблизи восточного берега, прибосфорский район. При расчете вейвлет-спектров использовался полный массив реконструированных полей, включая участки, полученные с использованием интерполяции во времени. Для уменьшения шумовой компоненты проводилось осреднение данных в квадрате  $3 \times 3$  (по 9 узлам сетки).

Максимальные значения амплитуд вейвлет-спектра приходились на годовой

цикл, который наиболее четко проявлялся в прибрежных районах (вблизи устья Дуная, прибосфорский район, восточное побережье). В открытой части моря амплитуды годового цикла были относительно меньше. В районе северо-западного шельфа и южного берега Крыма годовой цикл оказался ярко выраженным только в 2009 – 2010 гг., в другие годы пики весеннего цветения были смазаны. В районе восточного побережья до 2009 года преобладал полугодовой цикл, с двумя пиками цветения, но к 2009 году произошла перестройка и переход к одномодальному режиму. Годовой ход концентрации хлорофилла «а» с двумя максимумами также периодически наблюдается в районе СЗШ и вблизи устья Дуная.

Помимо годового цикла на вейвлет-спектрах отчетливо видны временные масштабы, указанные нами выше, плюс масштаб порядка 100 – 120 суток. На рис. 3, *a* показан, в качестве примера, вейвлет-спектр временного ряда логарифма хлорофилла «а» в центральной области восточной части Черного моря после фильтрации годового хода. Как видим, колебания поля имеют сложный перемежающийся характер с меняющимся во времени периодом. На графиках рис. 3, *б – г* показана динамика вейвлет-коэффициентов на выделенных нами масштабах: 22, 60 и 100 суток.



Р и с . 3. Вейвлет-спектр временного ряда логарифма концентрации хлорофилла «а» в центральной области восточной части Черного моря – *a*; сравнение поведения вейвлет-коэффициентов на масштабе колебаний 22 суток – *б*; 60 суток – *в* и 100 суток – *г*.

Как видим, колебания с достаточно большой вейвлет-амплитудой (характеризующей энергию процесса), присутствуют в изменчивости поля не постоянно. Колебания с масштабом 22 суток обостряются в период осенне-зимних ветров, изменчивость масштаба 60 суток не связана явно со временем года, но может периодически ослабляться или усиливаться. Масштаб 100 суток вносит вклад во временную дисперсию поля практически постоянно.

**Заключение.** Возможные причины, обуславливающие наличие подобной изменчивости – меандрирование ОЧТ с образованием цепочек вихрей и низкочастотные волны. В дальнейшем планируется выполнить аналогичные исследования изменчивости других поверхностных характеристик Черного моря – температуры и уровня поверхности. Предполагается, что сопоставление вейвлет-спектров, а также расчет взаимной корреляции вейвлет-амплитуд спектров полей разных характеристик поможет прояснить причины наблюдаемой изменчивости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев С.В., Станичный С.В. Эволюция вихрей и струй в северо-восточной части Черного моря осенью 1997 г. (спутниковые наблюдения) // Исслед. Земли из космоса. – 2000. – № 1. – С. 3 – 14.
2. Каримова С.С., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М. Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // Исслед. Земли из космоса. – 2011. – № 5. – С. 15 – 23.
3. Кушнир В.М., Станичный С.В. Индекс цвета в северо-западной части Черного моря по данным сканера MODIS // Исслед. Земли из космоса. – 2007. – № 4. – С. 62 – 73.
4. Siegel D.A., Peterson P., McGillicuddy Jr.D.J., Maritorena S., and Nelson N. B. Bio-optical footprints created by mesoscale eddies in the Sargasso Sea // Geophys. Res. Lett. – 2011. – V. 38, L13608. – doi:10.1029/2011GL047660.
5. Remote Sensing Department, Marine Hydrophysical Institute – <http://dvs.net.ua>.
6. Васечкина Е.Ф. Реконструкция полей температуры поверхности по фрагментарным данным дистанционного зондирования // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 3. – С. 48 – 65.
7. Васечкина Е.Ф. Возможности вейвлет-анализа для изучения пространственно-временной изменчивости содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 2. – С. 50 – 59.