

Возможности вейвлет-анализа для изучения пространственно-временной изменчивости содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое Черного моря

Представлены результаты анализа Фурье- и вейвлет-спектров пространственных и временных сечений массива спутниковых данных о содержании хлорофилла «а» в поверхностном слое Черного моря. Исходные поля предварительно обработаны для заполнения пропусков, вызванных наличием облачности, с использованием информации о корреляционных связях в выборке данных. Дискретность данных составляет одни сутки, пространственное разрешение – 7 км. Выполнялось вейвлет-преобразование данных вдоль двух меридиональных (32 и 37° в.д.) и одного широтного (43° с. ш.) разреза. Для нескольких пространственных масштабов – 25, 50, 100 и 150 км – анализировались временные развертки сечений вейвлет-спектров. Оценивалось время жизни неоднородностей разного масштаба вблизи берегов и в открытой части моря. Вычислялся интегральный показатель изменчивости поля как среднее абсолютных значений вейвлет-коэффициентов на разных масштабах. На всех масштабах наблюдалась значимая отрицательная корреляция этих показателей для восточной и западной областей Черного моря.

Ключевые слова: спутниковые данные, хлорофилл «а», пространственная изменчивость, вейвлет-анализ.

Уже по визуальному анализу спутниковых изображений цвета моря можно составить представление о том обилии информации о динамике гидрофизических полей поверхностного слоя, которое дает дистанционное зондирование. Глобальное покрытие, частота получения информации и ее доступность через сеть Интернет делают спутниковый мониторинг наиболее актуальным инструментом исследования пространственно-временной изменчивости верхнего слоя. В последнее время появляется все больше работ, посвященных изучению изменчивости различных гидрофизических полей на основе данных дистанционного зондирования.

Информация о содержании хлорофилла «а» в морской воде и первичной продуктивности является определяющей для оценки состояния морской экосистемы, эту информацию можно получать регулярно в течение длительного промежутка времени, используя дистанционные методы. Как известно, пространственное распределение хлорофилла «а» и фитопланктона характеризуется существенной неоднородностью, причем это свойство проявляется на всех масштабах. Множество работ посвящено изучению механизмов формирования «пятнистости» фито- и зоопланктона, например [1 – 4]. В настоящее время многие ученые разделяют мнение о том, что биологические процессы являются определяющими на малых масштабах, в то время как физические процессы более существенны на мезо- и макромасштабах порядка десятков и сотен километров [2]. Например, в работе [4] с помощью имитационного моделирования исследуется возможный механизм формирования пятен повышенной концентрации хлорофилла «а» путем вовлечения и последующей от-

носительной изоляции популяции автотрофных организмов в мезомасштабном циклоническом вихре.

Оптические поля в видимом диапазоне совместно с другими характеристиками поверхностного слоя могут служить источником для получения информации о гидродинамических процессах в водоеме. Спектральные методы используются для анализа пространственной изменчивости полей фито- и зоопланктона начиная с 80-х годов прошлого века [5]. Активно применяющийся в последние годы в самых различных областях знаний вейвлет-анализ может дать существенно больше информации по сравнению с традиционными методами. Настоящая работа посвящена изучению таких возможностей. Далее в статье будут приведены результаты исследования пространственно-временной изменчивости поля хлорофилла «а» с помощью вейвлет-анализа. Исходными данными послужили спутниковые снимки цветности моря, преобразованные в цифровые поля концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое Черного моря в летние сезоны 2003 – 2009 гг.

Материалы и методы. Вейвлет-анализ был разработан в середине 80-х годов как альтернатива преобразованию Фурье для неоднородных временных (или пространственных) рядов [6, 7]. В отличие от последнего вейвлет-анализ позволяет выделять одновременно как частотную, так и временную компоненты изменчивости, т. е. дает возможность анализировать временную изменчивость частотного спектра процесса. Вейвлет-преобразование обладает самонастраивающимся подвижным частотно-временным окном, одинаково хорошо выявляющим как низкочастотные, так и высокочастотные характеристики сигнала на разных временных масштабах. Вместо набора гармоник в преобразовании Фурье вейвлет-анализ использует солитоноподобную функцию – вейвлет $\psi(t)$, достаточно быстро убывающую вдоль временной (или пространственной) оси. На основе этой функции путем масштабных изменений и переносов строится базис, каждая из функций которого характеризует как определенную временную (пространственную) частоту, так и локализацию этой частоты на временной оси или в пространстве. Таким образом, в отличие от традиционного преобразования Фурье вейвлет-анализ дает развертку одномерного сигнала в двумерном пространстве, где частота и координата рассматриваются как две независимые переменные.

Вейвлет-преобразования, прямое и обратное, описываются следующими формулами:

$$C(a, b) = \int_R S(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad a = 2^j, b = k2^j, \quad (1)$$

$$S(t) = \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} C(j, k) \psi_{jk}(t), \quad (2)$$

где $S(t)$ – исходный сигнал; $C(a, b)$ – коэффициенты разложения; j, k – целые числа. Результатом вейвлет-преобразования одномерного временного ряда является двумерный массив коэффициентов $C(a, b)$ – амплитуд соответствующих базисных функций вейвлета $\psi(t)$. Распределение значений этих амплитуд в пространстве (a – временной масштаб, b – временная локализация), содер-

жащее информацию об эволюции относительного вклада компонент разного масштаба во времени, называется масштабно-временным спектром, или вейвлет-спектром.

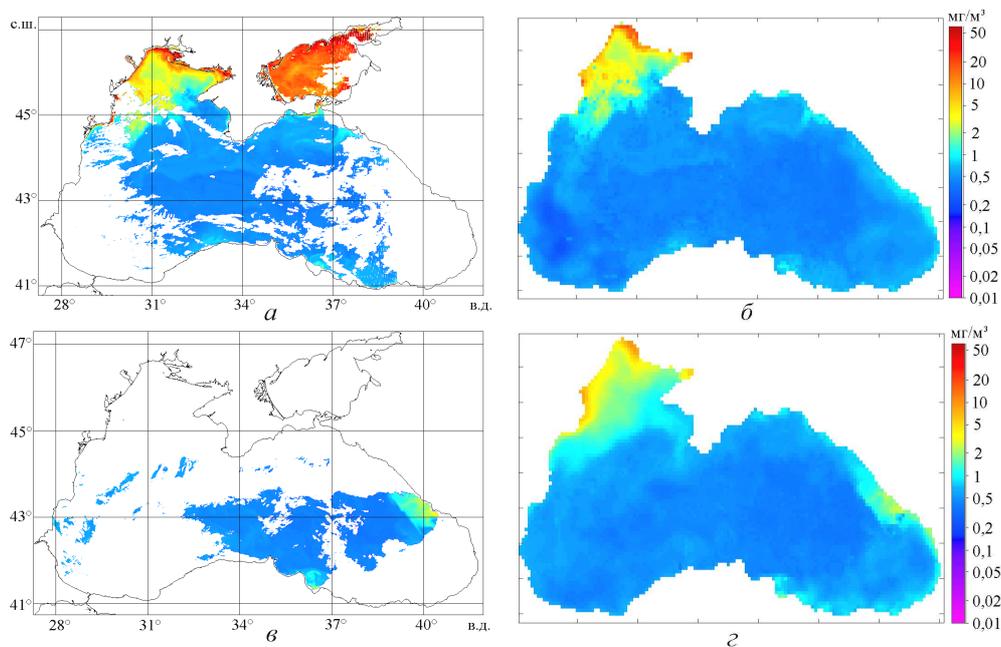
В работе использовались данные спутникового сканера *MODIS*, обработанные и пересчитанные в концентрацию хлорофилла «а» в поверхностном слое Черного моря [8]. Имеющиеся на снимках пропуски, обусловленные наличием облаков, заполнялись путем применения методики, подробно изложенной в [9, 10]. Метод основывается на использовании разложения по системе эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), построенных для ансамбля реализаций двумерных полей искомой характеристики. Коэффициенты разложения рассчитываются методом наименьших квадратов либо с использованием генетического алгоритма поиска.

Для расчета ЭОФ сначала необходимо вычислить четырехмерную ковариационную матрицу. Ансамбль реализаций, используемых для вычисления среднего и ковариационной матрицы, должен подбираться таким образом, чтобы выполнялись, хотя бы приблизительно, условия однородности и стационарности внешних воздействий. В настоящем исследовании ансамбль содержал выборку данных за летние сезоны 2003 – 2009 гг.

Данные были предварительно обработаны с помощью специальной процедуры фильтрации присутствующих на спутниковых снимках ошибок, т. е. неадекватно низких значений на границах «белых пятен». Фильтрация таких ошибок осуществлялась с помощью построения гистограммы распределения яркости на снимке и удаления «хвостов» – крайних экстремальных значений. Лишь после этого проводился пересчет яркости в концентрацию хлорофилла «а».

Пространственное разрешение снимков составляло 1 км, таким образом, каждый снимок за вычетом границ содержал более 300 000 точек, потенциально несущих полезную информацию. Имеющиеся вычислительные возможности не позволяли выполнить расчет четырехмерной пространственной ковариационной функции всего моря при разрешении 1 км, поэтому исходные поля осреднялись на сетке 7×7 км. Кроме того, вся акватория моря была поделена на два участка (западный и восточный), чтобы еще больше сократить размер получающейся ковариационной матрицы. Граница раздела проходила по центральной части моря (34° в. д.), западная часть после осреднения была представлена массивом данных 82×65 , в котором N_w узлов приходилось на область моря, восточная часть – массивом данных 62×76 с N_e значимыми узлами. Оба массива обрабатывались отдельно, для каждого вычислялась ковариационная матрица и ЭОФ. Однако в ходе процедуры реконструкции полей информация о соседней области, при необходимости, использовалась для восстановления поля в другой области [10].

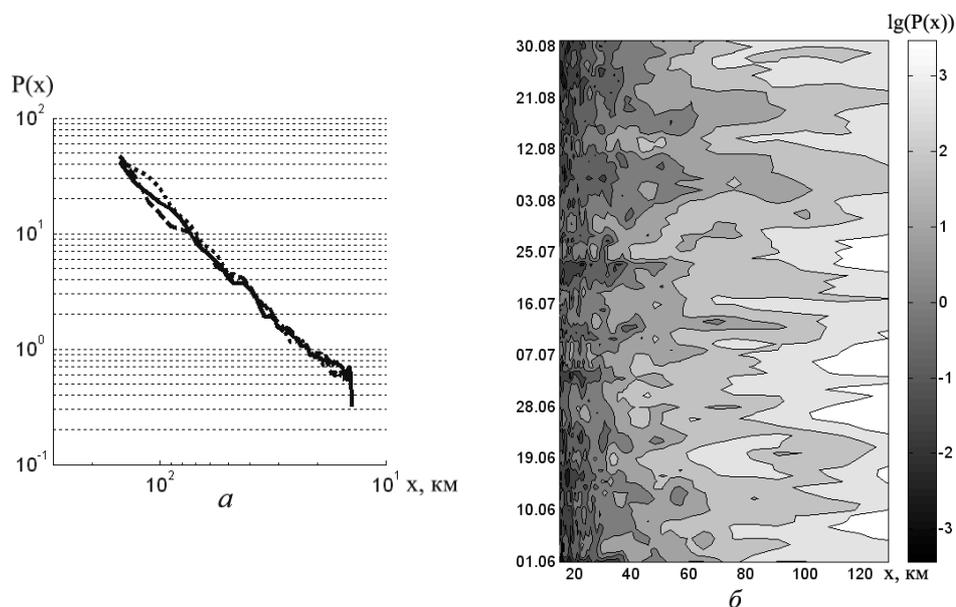
Примеры полученных после реконструкции полей хлорофилла «а» вместе с исходными данными показаны на рис. 1. Видно, что алгоритм позволяет достаточно адекватно, по крайней мере на качественном уровне, восстанавливать информацию об особенностях пространственного распределения искомой характеристики. Относительная ошибка реконструкции (к среднеквадратическому отклонению исходного поля) зависит, естественно, от количества пропусков и меняется от 0,05 до 0,6 при увеличении числа пропусков до 75% от общего количества точек.



Р и с. 1. Данные дистанционного зондирования за 5 июня (а) и 7 июня (в) 2007 г. и реконструированные по этим данным поля содержания хлорофилла «а» (б, г соответственно)

Восстановленные поля использовались затем для выполнения дальнейших расчетов. Было выбрано несколько пространственных сечений массива данных, это разрезы вдоль 43° с. ш., 31 и 37° в. д. Профили поля хлорофилла «а» вдоль этих разрезов анализировались с помощью Фурье- и вейвлет-анализа. Необходимо было обеспечить непрерывность данных во времени при том, что некоторые снимки содержали очень мало информации, а несколько дней в каждом сезоне и вовсе отсутствовали. В тех случаях, когда из-за отсутствия данных невозможно было использовать методику, изложенную выше, проводилась интерполяция поля во времени между двумя соседними полями. Если же отсутствовало подряд несколько снимков, интерполяция не проводилась и в массиве сохранялись пропуски, что, естественно, вносило ошибки. Далее будут приведены результаты анализа данных за 2003 г., когда удалось полностью восстановить все поля за летний сезон.

Результаты анализа данных. Для каждой выборки данных вдоль разрезов, перечисленных выше, были построены одномерные пространственные спектры. На рис. 2, а представлен их характерный вид (наклон в среднем составлял $-2,28$), на рис. 2, б – временная развертка коротковолновой части спектра вдоль 43° с. ш. (осреднение проводилось с шагом в несколько дней). Как видим, изменчивость спектра во времени довольно существенна, на масштабах 50 и 80 км возникают некоторые особенности, время жизни которых – от нескольких дней до 2 – 3 недель. Более точную информацию трудно получить, пользуясь Фурье-преобразованием, поэтому перейдем к результатам, которые дает вейвлет-анализ выборки данных за летний сезон 2003 г. вдоль указанных разрезов.



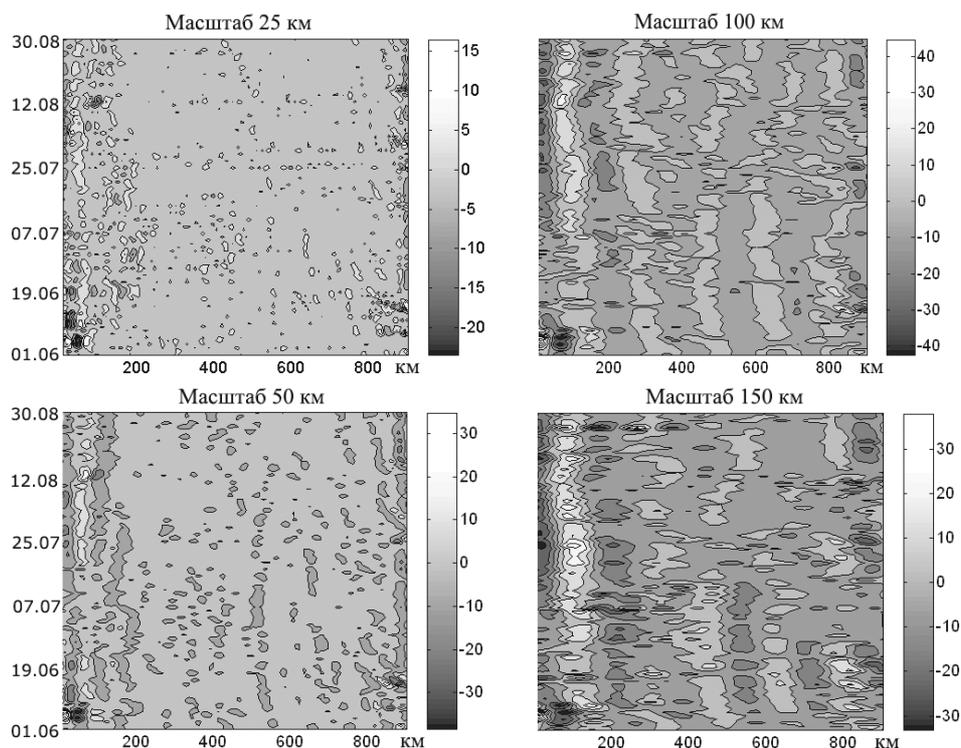
Р и с. 2. Средние пространственные спектры (лето 2003 г.) вдоль нескольких разрезов – *a*; временная изменчивость пространственного спектра неоднородностей поля хлорофилла «а» вдоль разреза по 43° с. ш. – *б*

Результатом вейвлет-преобразования одномерного пространственного ряда является двумерный массив коэффициентов $C(a, b)$. В традиционном графическом представлении вдоль оси Y отмечают пространственные масштабы (a), вдоль оси X – локализацию соответствующих компонент в пространстве (b). На рис. 3 – 5 предлагается несколько иная визуализация массива $C(a, b)$, вернее, массива $C(a, b, t)$, где t – время, поскольку вейвлет-анализ выполнялся для каждого поля из выборки данных за сезон.

Было выбрано несколько пространственных масштабов – 25, 50, 100 и 150 км, – для которых построены временные развертки сечений вейвлет-спектра аналогично Фурье-спектру, представленному на рис. 2, б. Диаграммы строились таким образом, что ось Y становилась временной осью, а ось X – координатной (в отличие от рис. 2, б, где по горизонтали располагались длины волн). На рис. 3 показана эволюция пространственных неоднородностей верхнего слоя Черного моря, пересекавших разрез вдоль 43° с. ш. в течение летнего сезона 2003 г.

На всех масштабах амплитуда неоднородностей вблизи берегов существенно выше, чем в открытом море. Более крупные образования существуют практически постоянно, а более мелкие имеют тенденцию к усилению интенсивности через некоторые промежутки времени. Анализ диаграмм, построенных для всего периода наблюдений (2003 – 2009 гг.), показал, что в среднем промежутки времени между последовательными усилениями мелкомасштабной вихревой активности составляют 1,5 – 2 мес. Из анализа диаграмм можно

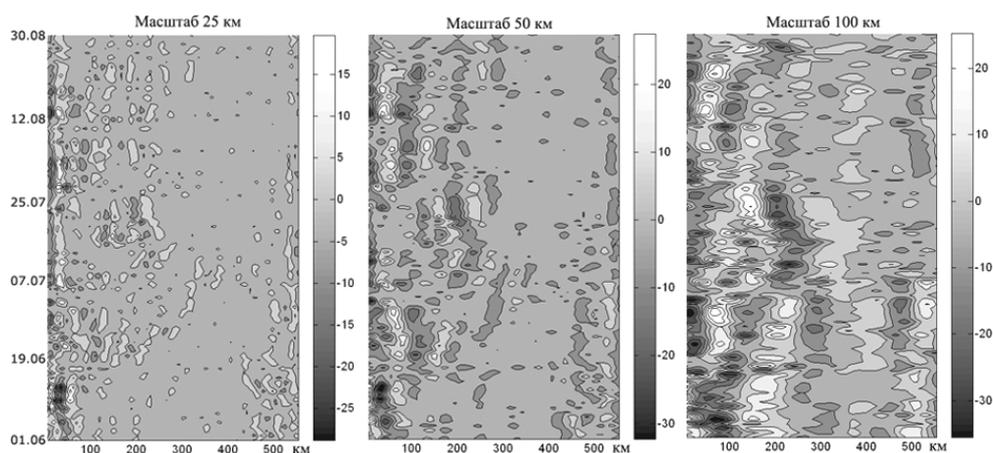
также заключить, что мелкомасштабные образования формируются в основном у берегов, с течением времени они отходят от берега, распространяясь дальше в море, но в открытом море высоких амплитуд колебаний на мелких масштабах не наблюдается.



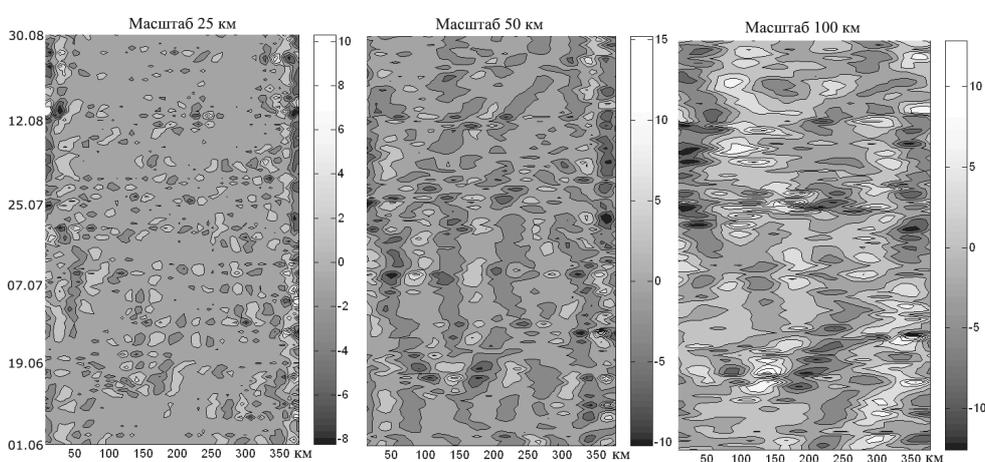
Р и с. 3. Временная изменчивость коэффициентов вейвлет-разложения профилей поля хлорофилла «а» вдоль разреза по 43° с. ш. на разных масштабах (слева направо – направление с запада на восток)

По степени вытянутости и вертикальной протяженности пятен на рисунках можно оценить «время жизни» пространственных неоднородностей на разных масштабах. Мелкомасштабные образования вблизи берегов могут существовать до двух недель и более, но в открытом море они разрушаются значительно быстрее, их время жизни исчисляется сутками. Крупные неоднородности существуют и вблизи берегов, и в открытом море длительное время, месяц и более.

Обращают на себя внимание также более высокие амплитуды колебаний в западной части моря по сравнению с восточной. В связи с этим представляет интерес сравнительный анализ рис. 4 и 5, на которых представлена эволюция пространственных неоднородностей на разных масштабах вдоль меридиональных разрезов в западной и восточной частях Черного моря.



Р и с. 4. То же, что на рис. 3, вдоль разреза по 32° в. д. (слева направо – направление с севера на юг)

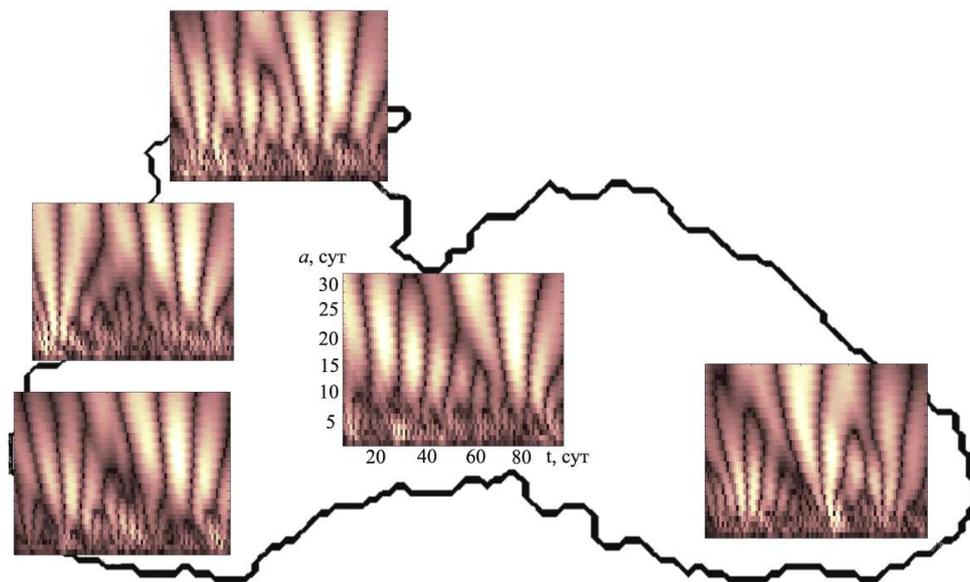


Р и с. 5. То же, что на рис. 3, вдоль разреза по 37° в. д. (слева направо – направление с севера на юг)

Как видно из рисунков, картина существенно различается для западной и восточной частей моря. Это естественно, поскольку север западной части представляет собой широкий шельф, где происходит активная генерация пространственных образований всех масштабов. В восточной части моря абсолютные значения амплитуд ниже, а пространственная изменчивость более однородна. Во временном развитии отчетливо просматриваются периоды усиления и затухания колебаний как в западной, так и в восточной частях моря.

На меридиональных разрезах также наблюдаются все те особенности, которые отмечались нами для широтного разреза. Аналогичные диаграммы были построены для всего ансамбля данных, результаты их анализа согласуются с приведенными выше. В некоторые годы активность формирования пространственных неоднородностей была выше, в другие – ниже, но в целом графики похожи.

Следующим шагом было выполнение вейвлет-анализа временных профилей массива данных в некоторых локальных областях моря. При этом проводилось осреднение данных в квадрате 3×3 (по 9 узлам сетки). На рис. 6 приведены полученные диаграммы вейвлет-коэффициентов в их традиционном представлении: по оси X – временная локализация, по оси Y – масштаб неоднородностей.

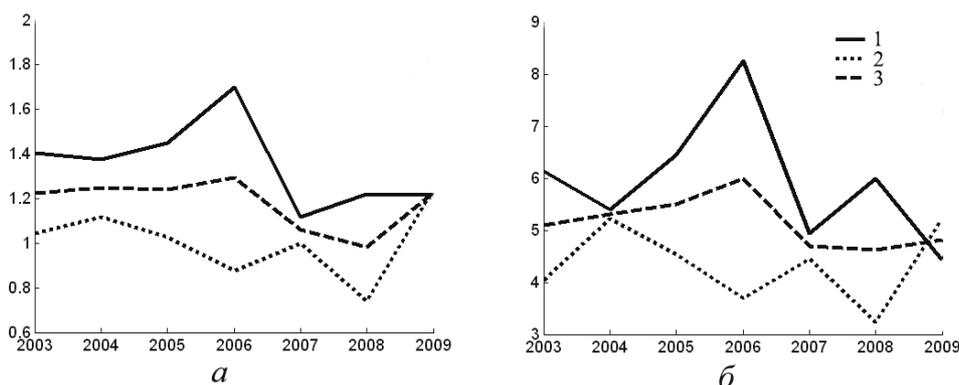


Р и с. 6. Вейвлет-спектры временных рядов в нескольких областях Черного моря (лето 2003 г.)

Более контрастные участки указывают на большие абсолютные значения амплитуд соответствующих компонент. Отчетливо видно уменьшение масштаба наиболее интенсивных компонент со временем (каскад энергии от крупных масштабов к более мелким), однако на диаграмме, полученной по данным вблизи устья Дуная, можно увидеть и обратный ход развития процесса – от мелких масштабов к более крупным. На рис. 6 также видна периодичность в увеличении амплитуд вейвлет-коэффициентов. На трехмесячный период наблюдений в данном случае (лето 2003 г.) приходится два всплеска активности.

Для выявления различий интегрального характера в пространственной изменчивости поля хлорофилла «а» в западной и восточной частях моря были вычислены показатели, представляющие собой средние абсолютные значения вейвлет-коэффициентов за весь летний сезон. Они рассчитывались для всего моря, а также отдельно для его западной и восточной частей. Сравнение этих величин показало, что усиление или ослабление процессов формирования пространственных неоднородностей происходит для западной и восточной частей моря в противофазе (рис. 7). По крайней мере в летний сезон наблюдается четкая отрицательная корреляция средних показателей изменчивости для восточной и западной областей на всех масштабах. Для выяснения при-

чин таких особенностей требуются дополнительные исследования с использованием, в первую очередь, атмосферных данных.



Р и с. 7. Средние показатели интенсивности формирования пространственной изменчивости поля хлорофилла «а» на масштабах 25 км – а и 150 км – б в летние сезоны 2003 – 2009 гг.: 1 – для западной части; 2 – для восточной; 3 – для моря в целом

Таким образом, вейвлет-анализ пространственной изменчивости поля хлорофилла «а» в поверхностном слое Черного моря дал интересные нетривиальные результаты. Рассчитанные вейвлет-спектры одномерных профилей поля позволяют выявить особенности пространственной динамики, не обнаруживаемые другими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Piontkovski S.A., Williams R., Peterson W.T. et al.* Spatial heterogeneity of the planktonic fields in the upper mixed layer of the open ocean // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* – 1997. – 148. – P. 145 – 154.
2. *Malchow H., Petrovskii S.V., Medvinsky A.B.* Numerical study of plankton-fish dynamics in a spatially structured and noisy environment // *Ecol. Modelling.* – 2002. – 149. – P. 247 – 255.
3. *Bracco A., Clayton S., Pasquero C.* Horizontal advection, diffusion, and plankton spectra at the sea surface // *J. Geophys. Res.* – 2009. – 114. – P. C02001 – C02011.
4. *Fennel K.* The generation of phytoplankton patchiness by mesoscale current patterns // *Ocean Dynam.* – 2001. – 52, № 2. – P. 58 – 70.
5. *Mackas D.L., Boyd C.M.* Spectral analysis of zooplankton heterogeneity // *Science.* – 1979. – 204. – P. 62 – 64.
6. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук.* – 1996. – 166, № 11. – С. 1145 – 1170.
7. *Козлов П.В., Чен Б.Б.* Вейвлет-преобразование и анализ временных рядов // *Вестник Кыргызско-Российского славянского университета.* – 2002. – 2, № 2. – С. 64 – 69.
8. *Remote Sensing Department. Marine Hydrophysical Institute.* – <http://dvs.net.ua>.
9. *Васечкина Е.Ф.* Сравнение пространственных ковариационных функций хлорофилла «а» и температуры поверхности Черного моря // *Системы контроля окружающей среды.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – С. 266 – 369.

10. *Васечкина Е.Ф.* Реконструкция полей температуры поверхности по фрагментарным данным дистанционного зондирования // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 3. – С. 48 – 65.

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

Материал поступил
в редакцию 06.11.10
После доработки 19.12.10

АНОТАЦІЯ Представлено результати аналізу Фур'є- та вейвлет-спектрів просторових і часових розрізів масиву супутникових даних про вміст хлорофілу «а» в поверхневому шарі Чорного моря. Вихідні поля попередньо оброблені для заповнення пропусків, викликаних наявністю хмарності, з використанням інформації про кореляційні зв'язки у вибірці даних. Дискретність даних становить одну добу, просторова роздільна здатність – 7 км. Виконувалося вейвлет-перетворення даних уздовж двох меридіональних (32 і 37°с. д.) і одного широтного (43°пн. ш.) розрізу. Для кількох просторових масштабів – 25, 50, 100 і 150 км – аналізувалися тимчасові розгортки перетинів вейвлет-спектрів. Оцінювався час життя неоднорідностей різних масштабів поблизу берегів та у відкритій частині моря. Обчислювався інтегральний показник мінливості поля як середнє абсолютних значень вейвлет-коефіцієнтів на різних масштабах. На всіх масштабах спостерігалася значуща негативна кореляція цих показників для східної та західної областей Чорного моря на всіх масштабах.

Ключові слова: супутникові дані, хлорофіл «а», просторова мінливість, вейвлет-аналіз.

ABSTRACT Results of the Fourier and wavelet spectra analysis of spatial and temporal sections of satellite data on chlorophyll «a» content in the Black Sea surface layer are represented. Using the information on correlations in the data sample, the initial fields are preprocessed to fill the gaps resulted from cloudiness. Data discreteness is one day, spatial resolution is 7 km. The data wavelet transformation is performed along two meridian (32° E and 37° E) and one latitudinal (43° N) sections. Temporal dynamic of wavelet spectra are analyzed for the following spatial scales: 25, 50, 100 and 150 km. Lifetime of heterogeneities of various scales near the coast and in the open sea is estimated. The integral index of the field variability is calculated as an average of the absolute values of the wavelet coefficients on various scales. Significant negative correlation of these indices on all the scales for the eastern and western regions of the Black Sea is observed.

Keywords: satellite data, chlorophyll «a», spatial variability, wavelet-analysis.