

Исследование структуры пространственной корреляционной функции поля хлорофилла a в поверхностном слое Черного моря по данным дистанционного зондирования

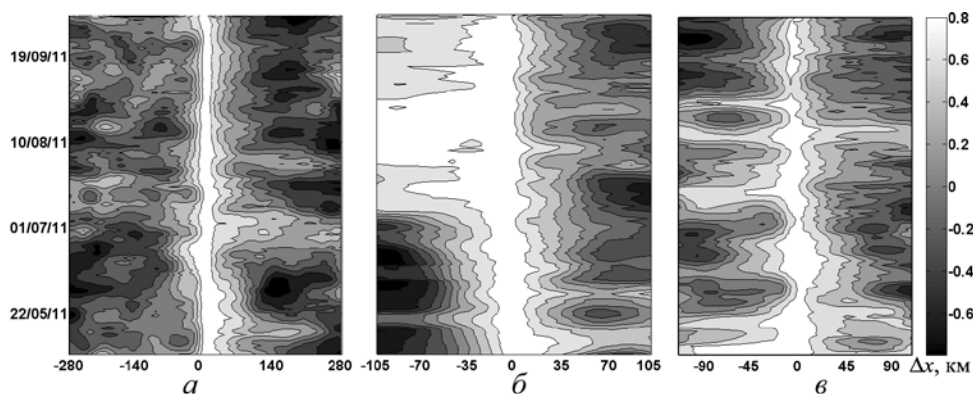
Изучается синоптическая и мезомасштабная пространственно-временная изменчивость полей в поверхностном слое Черного моря путем анализа их корреляционных функций. Используются данные спутникового сканера *MODIS*, которые предварительно обрабатывались с целью восполнения пропусков. По этим данным вдоль выбранных зональных и меридиональных разрезов строится вейвлет-спектр $W(a, b, t)$, а затем вычисляется автокорреляционная функция вейвлет-коэффициентов для каждого из масштабов a_i . Анализ показал, что пространственно-временная изменчивость этой функции характеризуется присутствием перемежающихся колебаний в широком диапазоне масштабов 50 – 250 км и 10 – 200 сут. Наиболее ярко проявляются колебания с пространственным масштабом 150 – 170 км и периодами 10 – 60 сут.

Ключевые слова: вейвлет-анализ, пространственно-временная изменчивость, хлорофилл a , спутниковые данные.

Спутниковый мониторинг в последние годы становится широко используемым инструментом исследования пространственно-временной изменчивости верхнего слоя. По спутниковым снимкам в видимом диапазоне можно оценить содержание хлорофилла a в поверхностном слое, которое является важной характеристикой биопродуктивности водоема. Оптические поля могут также служить источником для получения информации о гидродинамических процессах в перемешанном слое. Захваченные вихрями воды с повышенным содержанием, например, хлорофилла a заметно выделяются на снимках поверхности моря, следовательно, на основе спутникового дистанционного зондирования по последовательности изображений обширных акваторий моря можно изучать эволюцию мезомасштабных динамических структур. Этому вопросу посвящено большое количество работ, например [1 – 6]. По нашему мнению, информация о цветности моря лучше подходит для исследования, чем данные ИК-радиометров, поскольку температура поверхности моря, измеренная со спутника, часто подвержена искажениям, связанным с образованием тонкой прогретой пленки, и эти искажения могут иметь большой пространственный масштаб. Цветность моря, напротив, является показателем интегральным в том смысле, что сигнал, получаемый спутником, формируется в слое глубиной несколько метров. Несмотря на то что данные спутникового зондирования могут существенно отличаться от измеренных *in situ*, их можно использовать при изучении мезомасштабной изменчивости, поскольку анализируются относительные изменения концентраций во времени и пространстве. Целью настоящей работы является исследование синоптической и мезомасштабной пространственно-временной изменчивости полей в поверхностном слое Черного моря путем анализа их корреляционных функций.

Материалы и методы. К настоящему времени пространственная ковариационная функция может быть оценена достаточно точно, поскольку накоплены большие массивы ежедневных наблюдений. Наличие облачности над морем мешает получению полной информации, поэтому отсутствующие данные приходится восстанавливать, используя знания о корреляционных связях между точками поля. Для получения массива ежедневных полей хлорофилла a в поверхностном слое Черного моря был использован алгоритм их реконструкции по фрагментарным данным [7]. Обработано 1830 реализаций, полученных по данным спутникового сканера *MODIS* за период с марта 2003 г. по октябрь 2011 г. [8]. В тех случаях, когда из-за отсутствия данных невозможно было использовать методику восстановления [7], проводилась линейная интерполяция во времени. Такая процедура, естественно, вносит искажения в изменчивость полей, поэтому для уменьшения ее влияния на результаты дальнейших исследований были отобраны участки с максимальным количеством данных (в летне-осенние сезоны). В настоящей работе практически все расчеты выполнялись с выборкой данных с мая по октябрь 2011 г. Полученные в итоге поля имели шаг по пространству 7 км, дискретность по времени – 1 сут.

Пространственно-временная изменчивость поля хлорофилла a изучалась по поведению пространственной корреляционной функции вдоль нескольких разрезов, пересекающих акваторию в меридиональном и зональном направлениях. Для каждого из них строилась одномерная пространственная корреляционная функция по суточным данным с осреднением по пространству. Выполнив такую процедуру для каждого из ежедневных полей, можно отследить изменения корреляционной функции во времени. Для удаления шума и мелкомасштабных флуктуаций полученная двумерная функция $R(\Delta x, t)$ сглаживалась по времени скользящим средним с интервалом 5 сут. Корреляционная функция рассчитывалась отдельно для западной и восточной половины моря (северной и южной – для меридионального разреза), центральная точка разреза принималась за начало отсчета. На рис. 1 показаны пространственные корреляционные функции вдоль 43° с. ш., 31° и 37° в. д.



Р и с. 1. Временная динамика одномерных пространственных функций поля хлорофилла a в поверхностном слое Черного моря по данным 2011 г. вдоль разрезов по 43° с. ш. – a , 31° в. д. – b , 37° в. д. – v

Как видим, поведение корреляционной функции заметно меняется во времени, на смену периодам быстрого падения корреляции с увеличением сдвига приходят относительно кратковременные периоды, когда на больших расстояниях (более 100 км) наблюдается существенная взаимосвязь значений поля. Вероятно, в эти периоды поле изменяется под воздействием неких крупномасштабных вихреволновых образований. Однако получить представление о пространственно-временных масштабах этих образований из приведенных графиков не представляется возможным. Высокая корреляция в северной области Черного моря (рис. 1, б) связана с развитием специфической летней ситуации на северо-западном шельфе, которая повторяется из года в год, хотя бывают и исключения. Будем исследовать далее каждый из этих разрезов по очереди, начиная с первого – зонального разреза вдоль 43° с. ш.

Для более детального изучения структуры пространственной корреляционной функции и изменчивости поля, обуславливающей ее динамику, необходимо выполнить вейвлет-преобразование данных вдоль выбранных разрезов в каждый момент времени и затем вычислить корреляционную функцию полученных коэффициентов. Вейвлет-преобразование разлагает сигнал на компоненты разного масштаба, в данном случае это пространственные компоненты. Вычислив автокорреляционные функции для каждого из этих компонентов, можно получить распределение корреляции одновременно и по масштабу, и по пространственному сдвигу. В результате этих расчетов получим трехмерный массив корреляционной функции исследуемого поля, который содержит информацию о том, как распределяется корреляция в пространстве (масштаб, пространственный сдвиг) в каждый момент времени. Размерности массива: пространственный масштаб, пространственный сдвиг, время.

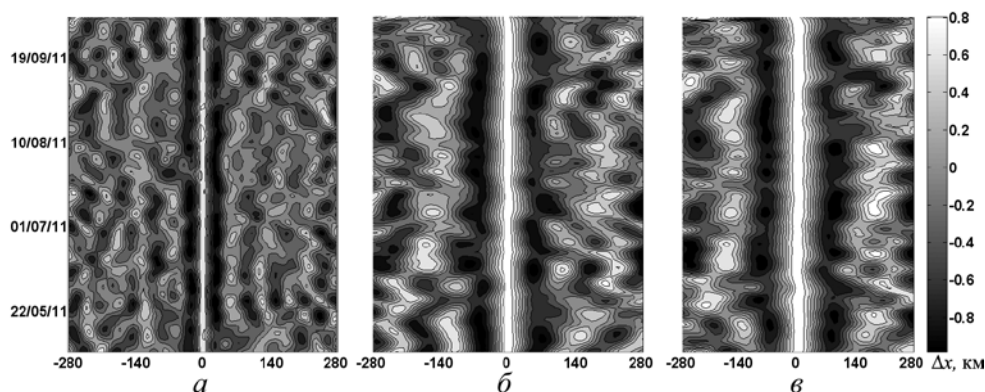
Пусть $F(x, t_k)$ обозначает последовательность значений поля хлорофилла a в момент времени t_k вдоль некоторого пространственного разреза длиной S . Тогда вейвлет-преобразование этой функции можно записать в виде

$$W(a, b, t_k) = \int_S F(x, t_k) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad k = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Повторив эти вычисления для каждого поля из имеющегося массива данных, получим $W(a, b, t)$ – трехмерный массив амплитуд соответствующих базисных функций вейвлета $\psi(x)$. Распределение значений этих амплитуд в пространстве (a – пространственный масштаб, b – пространственная локализация, t – время) содержит информацию об изменчивости относительного вклада компонентов разного масштаба в пространстве и во времени. Для того чтобы уменьшить шумовую составляющую, применим скользящее осреднение с интервалом 5 сут к массиву $W(a, b, t)$. Затем рассчитаем корреляционную функцию вдоль оси b , т. е. вдоль пространственной координаты массива вейвлет-коэффициентов для каждого масштаба a_j и в каждый момент времени t_k :

$$C_x^j(a_j, dx, t_k) = \frac{1}{S} \int_S W(a_j, b, t_k) W(a_j, b - dx, t_k) db. \quad (2)$$

Полученный массив представляет собою оценку корреляции на различных пространственных масштабах в каждый момент времени. Для выявления более четкой картины можно вновь выполнить сглаживание массива вдоль временной координаты скользящим средним с небольшим периодом. Анализ результирующего массива целесообразно проводить путем рассмотрения его сечений по разным координатам. Например, рассмотрим поведение корреляционной функции вейвлет-коэффициентов, рассчитанной по данным 2011 г., на нескольких пространственных масштабах (рис. 2).



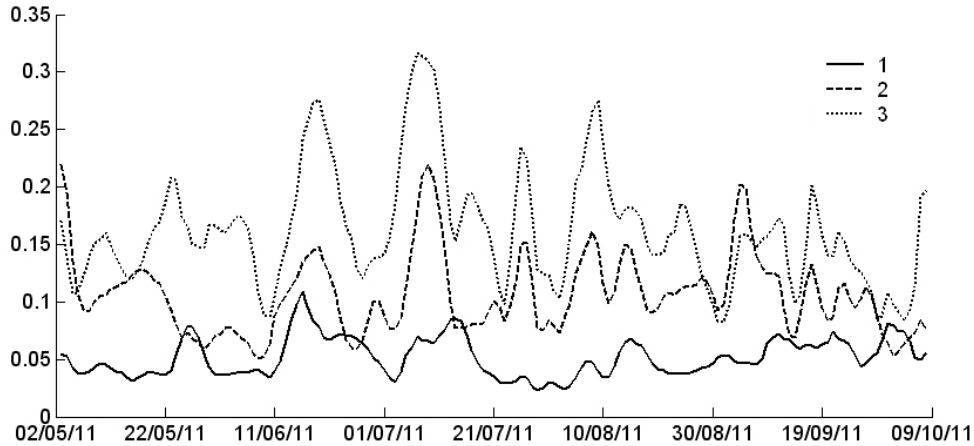
Р и с. 2. Временная динамика одномерных пространственных корреляционных функций коэффициентов вейвлет-разложения поля хлорофилла a по данным 2011 г. вдоль разреза по 43° с. ш. на масштабах: a – 50 км; b – 100 км; v – 150 км

Результаты и обсуждение. Как видим, диаграммы существенно разнятся: если на масштабе 50 км корреляция при сдвиге свыше 30 км большую часть времени отсутствует, то в изменчивости поля с масштабами 100 км и в особенности 150 км наблюдается значимая взаимосвязь. Временную изменчивость корреляционной функции можно визуально отследить, прокручивая видеоролик с изображениями полей этой функции в координатах масштаб – пространственный сдвиг. При таком анализе выясняется, что практически на протяжении всего периода времени на масштабах 250 км и более наблюдаются ярко выраженные максимумы корреляции вдоль всей оси сдвигов. Это говорит о том, что изменчивость таких масштабов присутствует в поверхностном слое моря почти постоянно и находит свое отражение в реализациях поля цветности. Причиной, вызывающей такую изменчивость поля цветности моря, по всей видимости, нужно считать влияние Основного Черноморского течения (ОЧТ), западного и восточного круговоротов.

На фоне этой изменчивости периодически возникают пространственные колебания корреляционной функции в интервале 50 – 200 км и чаще – в интервале 150 – 170 км. Время жизни таких колебаний невелико, не больше недели, повторяемость составляет от 10 до 50 сут и более. С целью анализа этой повторяемости рассмотрим временные ряды дисперсии корреляционной функции для выбранных масштабов a_j , равных 50, 100 и 150 км (рис. 3):

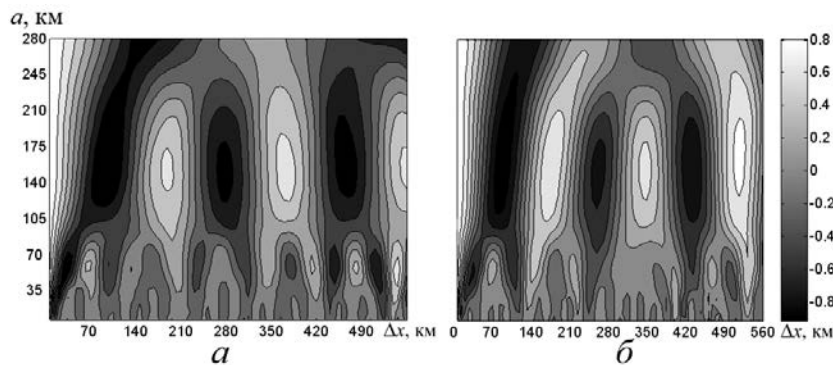
$$\sigma(a_j, t) = \frac{1}{L\Delta x} \sum_{i=1}^L \left(C_x^j(a_j, i\Delta x, t) - [C_x^j(a_j, t)] \right)^2, \quad (3)$$

где $[C_x^j(a_j, t)]$ – среднее значение коэффициента пространственной корреляции для масштаба a_j в момент времени t ; Δx – шаг сетки, равный 7 км; L – максимальный сдвиг корреляционной функции.



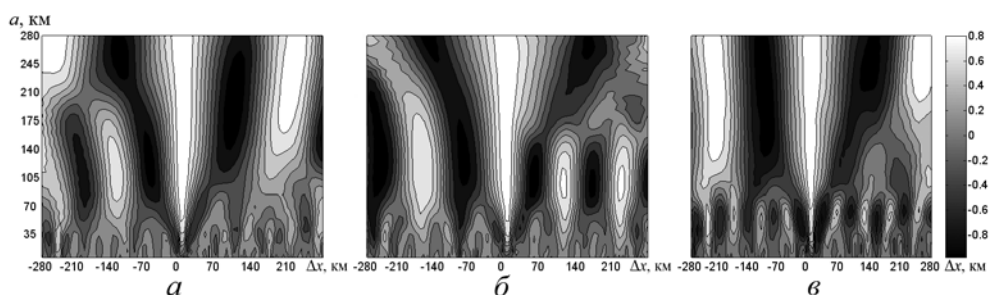
Р и с. 3. Графики временной изменчивости дисперсии (3) коэффициентов пространственной корреляции для масштабов: 1 – 50 км; 2 – 100 км; 3 – 150 км

Положение локальных максимумов на графиках указывает на моменты времени, когда в поле цветности возникают пространственные колебания соответствующего масштаба, при этом корреляционная функция приобретает вид слабо затухающей гармонической функции с амплитудой 0,6 – 0,8. Заметим, что для масштабов 100 и 150 км положение максимумов дисперсии часто совпадает, в этих случаях колебания охватывают целый интервал пространственных масштабов от 100 км и выше. На рис. 4 показан вид корреляционной функции вейвлет-спектра цветности моря вдоль зонального разреза в моменты времени, когда дисперсия (3) максимальна. Следует отметить, что в эти моменты высокая корреляция вейвлет-коэффициентов наблюдается на расстояниях до 500 км.



Р и с. 4. Сечения пространственной корреляционной функции вейвлет-спектра для крайней левой точки разреза по 43° с. ш. в некоторые моменты времени (2011 г.): а – 17 июня; б – 8 июля

На рис. 5 приведены характерные паттерны, которые наблюдаются в изменчивости корреляционной функции вейвлет-спектра, вычисленной для центральной точки разреза по 43° с. ш. На рис. 5, *а* отражена ситуация, когда корреляция в западной части моря определяется наличием вихреволнового образования с масштабом ~ 100 км, в то время как в восточной части доминирует изменчивость с масштабом $200 - 250$ км. На рис. 5, *б* показана более симметричная картина – можно видеть, что масштаб $\sim 100 - 120$ км превалирует в изменчивости поля как в западной, так и в восточной части моря. На рис. 5, *в* отражена также довольно типичная ситуация, когда на фоне крупномасштабной изменчивости в обеих частях моря наблюдаются неоднородности размером ~ 50 км.

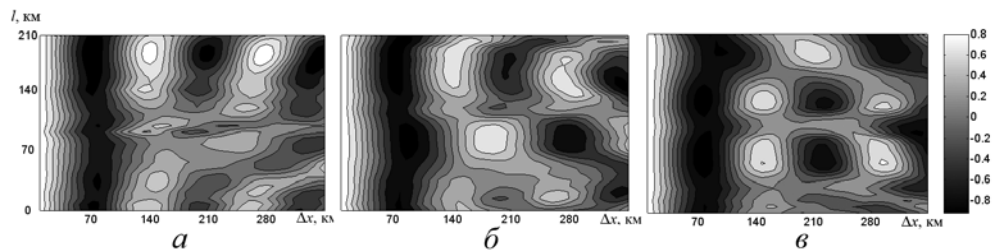


Р и с. 5. Сечения пространственной корреляционной функции вейвлет-спектра для центральной точки разреза по 43° с. ш. в некоторые моменты времени (2011 г.): *а* – 16 мая; *б* – 10 июня; *в* – 24 мая

Для того чтобы лучше понять природу данного явления, выполним вычисления по формуле (1) для всех зональных сечений r_m ($m = 1 - 30$) с дискретностью 7 км в пределах прямоугольной области с координатами $44^\circ 20'$ с. ш., $28^\circ 40'$ в. д. – $42^\circ 10'$ с. ш., $38^\circ 20'$ в. д. (центральная часть моря). Таким образом получим четырехмерный массив коэффициентов вейвлет-преобразования $W(a, r, l, t)$, где r – меридиональная, l – зональная координата. Зафиксировав определенный масштаб a_i , можно построить развертку во времени зональной корреляционной функции в пределах данной области площадью 210×700 км. Визуальный анализ позволяет заключить, что образования, аналогичные представленным на предыдущих рисунках, с пространственным масштабом ~ 150 км присутствуют практически постоянно в той или иной части выбранной области, слабо мигрируя вдоль меридиональной оси. Меридиональный размер этих образований может достигать 70 км. Колебания более мелких масштабов возникают заметно реже.

На рис. 6 показана ситуация, отражающая интенсификацию вихреволновой активности в сентябре 2011 г. Видно, что волна, возникшая в северной части центральной области моря к 11 сентября, развивается как бы в обратном направлении, и к 26 сентября существуют уже две цепочки вихреволновых образований примерно одного масштаба. При этом в северной области наблюдается появление еще одной более длинной волны. По всей видимости, наблюдаемые колебания в поле корреляционной функции вызваны цепочками вихрей, образующихся вследствие меандрирования ОЧТ и смещаю-

щихся к центральной области моря (при этом наблюдаемое относительно короткое время проявления этих образований в поле хлорофилла a , возможно, объясняется нивелирующим влиянием биологических факторов). В качестве другой вероятной причины данного явления можно рассматривать также низкочастотные волны. Как показано в [1] на основании анализа экспериментальных и теоретических исследований, разделение возмущений синоптического масштаба на волновые и вихревые является достаточно условным.



Р и с. 6. Зональная пространственная корреляционная функция вейвлет-спектра на масштабе 150 км в области с координатами $42^{\circ} 10' - 44^{\circ} 20'$ с. ш., $28^{\circ} 40' - 38^{\circ} 20'$ в.д. (2011 г.): a – 11 сентября; b – 18 сентября; v – 26 сентября

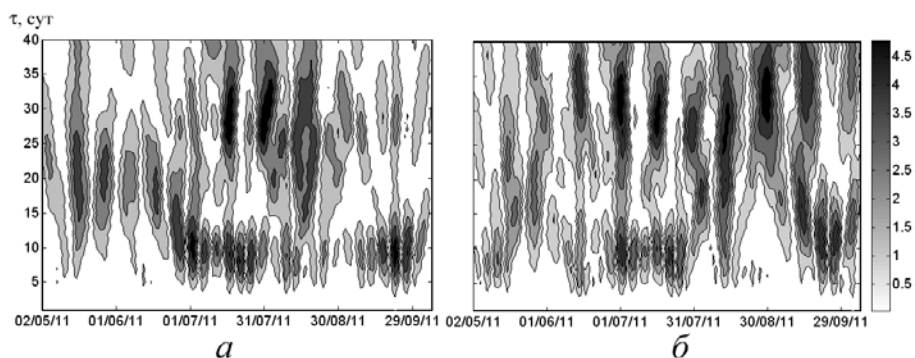
Визуальный анализ временной изменчивости корреляционной функции позволяет заключить, что интенсивность вихреволновых образований не постоянна и существуют периоды ее значительного роста. Для уточнения временных масштабов наблюдаемого явления был построен временной ряд суммарной дисперсии (3) коэффициентов корреляции амплитуд вейвлет-спектра на нескольких выделенных масштабах (105, 136, 154, 168, 210 км) и выполнено его вейвлет-преобразование:

$$W_{\sigma}(\tau, h) = \int_T \sum_j \sigma(a_j, t) \frac{1}{\sqrt{\tau}} \psi\left(\frac{t-h}{\tau}\right) dt, \quad (4)$$

где τ – временной масштаб; h – локализация во времени; T – длина ряда наблюдений.

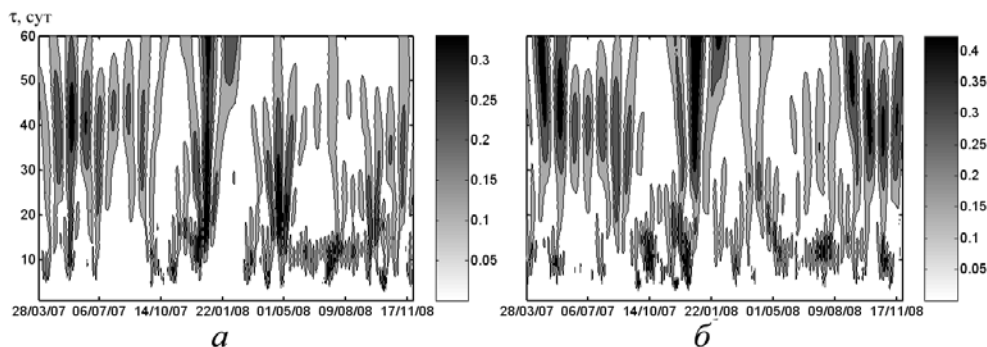
Полученный спектр представлен на рис. 7, a . Можно также просуммировать абсолютные значения коэффициентов корреляции для всех пространственных сдвигов и вычислить среднее по всем выбранным масштабам. Полученный временной ряд был также подвергнут вейвлет-преобразованию (рис. 7, b).

На обеих диаграммах наблюдаются два периода интенсификации колебаний с временным масштабом ~ 10 сут: в конце июня – начале июля и во второй половине сентября. Наблюдаются также и колебания больших масштабов, $\sim 25 - 50$ сут. Возможно, они связаны с лунным циклом, однако, заметим, что и те и другие колебания перемежающиеся, т. е. присутствуют в спектре не постоянно. По многочисленным расчетам была проведена оценка интервала времени между последовательными моментами интенсификации колебаний на разных пространственных масштабах, он составляет в среднем 70 – 90 сут. Такую долгопериодную изменчивость невозможно отследить на текущей выборке, поэтому обратимся к другим данным.



Р и с. 7. Вейвлет-спектры: временного ряда суммарной дисперсии коэффициентов пространственной корреляции в интервале масштабов 105 – 210 км – *а*; временного ряда средних сумм абсолютных значений коэффициентов корреляции для всех пространственных сдвигов в том же интервале масштабов – *б*

До сих пор мы анализировали данные за период с мая по октябрь 2011 г., поскольку для получения качественных оценок поведения пространственной корреляционной функции необходимо было выбрать отрезок времени, максимально заполненный данными с минимумом интерполированных во времени полей. Однако предполагаемую долгопериодную изменчивость можно попытаться проанализировать на более длинном ряду.



Р и с. 8. Вейвлет-спектры временных рядов дисперсий коэффициентов пространственной корреляции по данным 2007 – 2008 гг. для масштабов 100 км – *а*, 150 км – *б*

На рис. 8 показаны вычисленные по выборке 2007 – 2008 гг. вейвлет-спектры дисперсий коэффициентов пространственной корреляции на масштабах 100 и 150 км, относительно хорошо обеспеченной данными. На спектре отчетливо выделяются области увеличения дисперсии (т. е. возникновения пространственных колебаний в поле хлорофилла *а*) с временными масштабами 25 – 60 сут и меньшей интенсивностью, ~ 10 сут. Присутствуют и более длиннопериодные составляющие, которые определяют повторяемость данного явления с интервалом 90 – 200 сут. Эти особенности спектра легко объяснить, рассматривая изменения корреляционной функции в динамике. Продолжительность наблюдения отчетливо выраженной пространственной периодичности невелика, 5 – 7 сут. Через небольшой промежуток времени

возникает новая волна, которая также наблюдается несколько дней. С такой цикличностью явление может продолжаться до полутора месяцев, далее следует перерыв, во время которого выраженной пространственной изменчивости нет. Другими словами, имеет место как бы прохождение группы волн с периодом ~ 10 сут и огибающей с периодом $\sim 60 - 70$ сут, что и обуславливает локальные экстремумы вейвлет-амплитуд в этих диапазонах масштабов (рис. 7, 8). Это явление время от времени интенсифицируется, интервал между двумя последовательными усилениями изменяется в пределах $90 - 200$ сут.

Перейдем к анализу корреляционной функции, построенной для коэффициентов вейвлет-преобразования сечений поля хлорофилла a вдоль меридианов 31 и 37° в. д. Здесь наблюдается примерно та же картина, что и для зонального разреза. Периодически возникают гармонические колебания корреляционной функции в некотором интервале масштабов. Если на зональном разрезе чаще возникали колебания $\sim 150 - 170$ км, то в изменчивости вдоль меридиана чаще наблюдаются колебания меньшего масштаба, $\sim 70 - 100$ км. Вне этих периодов интенсификации корреляция довольно быстро уменьшается с увеличением пространственного сдвига, ее радиус линейно зависит от масштаба изменчивости (рис. 9, а).

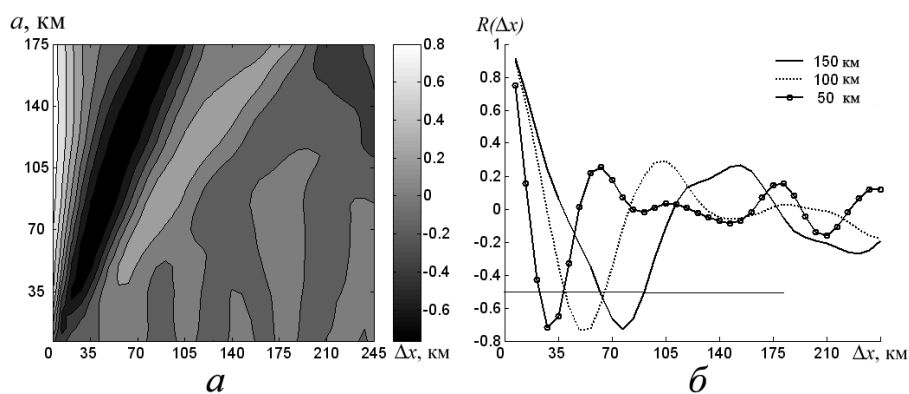


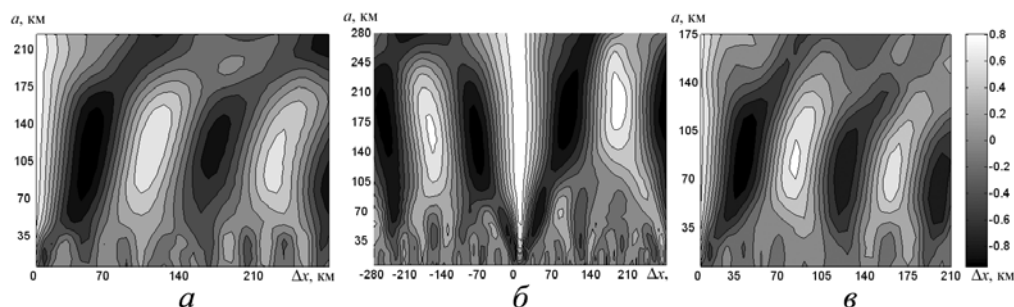
Рис. 9. Меридиональный разрез по 37° в. д.: a – среднее поле корреляционной функции всего спектра изменчивости; b – средние пространственные корреляционные функции для выбранных масштабов

Представляет интерес сопоставление меридиональных и зональных масштабов наблюдающихся вихреволновых образований. Осреднив по времени корреляционные функции вейвлет-коэффициентов на выбранных масштабах изменчивости (рис. 9, б), можно оценить радиус корреляции для каждого из них. Как видно на графиках, функции имеют вид, характерный для затухающих гармонических колебаний, поэтому для оценки радиуса корреляции выберем положение точки второго пересечения осредненной по времени корреляционной функции с уровнем $R = -0,5$ (R – коэффициент корреляции). Сравним значения средних радиусов корреляции, вычисленные для трех выбранных разрезов (таблица).

Оценки радиуса корреляции для нескольких масштабов изменчивости поля хлорофилла a вдоль меридиональных и зонального разрезов по данным 2011 г.

| Масштаб изменчивости, км | Радиус корреляции, км | | | R_w/R | R_e/R |
|--------------------------|--|---------------------------------------|--|---------|---------|
| | Меридиональный разрез по 31° в. д. (R_w) | Зональный разрез по 43° с. ш. (R) | Меридиональный разрез по 37° в. д. (R_e) | | |
| 50 | 100 | 112 | 90 | 0,90 | 0,80 |
| 100 | 70 | 80 | 63 | 0,88 | 0,78 |
| 150 | 35 | 37 | 37 | 0,95 | 1 |

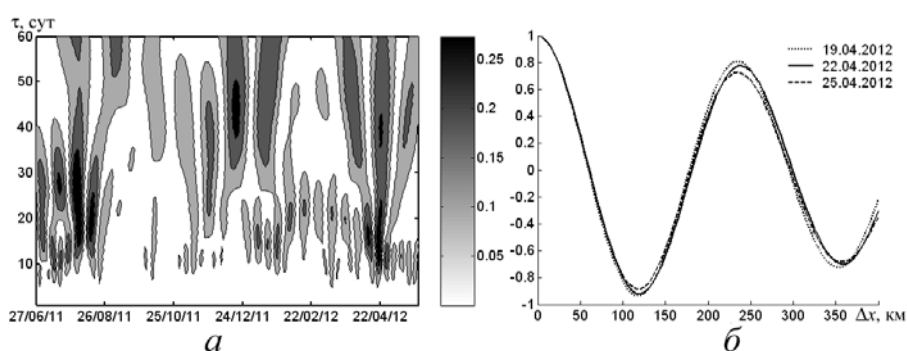
Соотношение меридионального и зонального радиусов меньше единицы, что указывает на эллиптическую форму пространственных неоднородностей. Можно также попытаться оценить характерную форму вихрей, выявляя ситуации четко проявляющихся гармонических колебаний на диаграммах сечений пространственной корреляционной функции и сопоставляя графики, построенные по меридиональным и зональным разрезам. Наблюдавшиеся вихревые образования имели форму эллипса, отношение меридиональных размеров к зональным составляло $\sim 0,7$ для западной части и $\sim 0,5$ – для восточной. Приведем для примера полученные по данным за 4 – 6 июля 2011 г. сечения корреляционной функции вейвлет-спектра (рис. 10). Корреляция выше 0,6 в западной части моря наблюдается на меридиональном разрезе в области масштабов 70 – 150 км (рис. 10, *a*), на зональном разрезе – 100 – 210 км (рис. 10, *б*); в восточной части – на меридиональном разрезе в области масштабов 50 – 120 км (рис. 10, *в*), на зональном – 140 – 250 км (рис. 10, *б*). Вычислив средние значения в этих интервалах и найдя их отношение, получим 0,45 для восточной части и 0,7 – для западной. Некоторая зональная вытянутость наблюдаемых вихреволновых образований, по всей видимости, определяется положением и направлением ОЧТ.



Р и с. 10. Сечения пространственной корреляционной функции вейвлет-спектра поля хлорофилла a по данным 4 – 6 июля 2011 г.: *a* – меридиональный разрез по 31° в. д. (слева – направо – направление с севера на юг); *б* – зональный разрез по 43° с. ш. (слева – направо – направление с запада на восток); *в* – меридиональный разрез по 37° в. д. (слева – направо – направление с севера на юг)

Представляет несомненный интерес сопоставление полученных особенностей динамики пространственной корреляционной функции поля хлорофилла a по данным 4 – 6 июля 2011 г. ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2014, № 2 41

филла *a* с другими полями поверхностных характеристик Черного моря. Для этого были выбраны поля температуры поверхности, полученные модельным путем с усвоением всей имеющейся информации [9]. Массив данных о ТПМ с 27 июня 2011 г. по 25 мая 2012 г. был проанализирован с использованием той же последовательности действий. Построены аналогичные приведенным на рис. 7, 8 вейвлет-спектры дисперсий временных рядов коэффициентов корреляции, вычисленных для разных пространственных масштабов (рис. 11, *a*). Видно, что вейвлет-спектры очень похожи на аналогичные спектры для поля хлорофилла *a*, повторяемость ситуаций интенсификации вихреволновой активности по имеющимся данным можно грубо оценить в 4 – 6 мес. Пространственный масштаб несколько больше, чем для поля хлорофилла *a*, ~ 150 – 230 км. Длительность периодов существования пространственных волн в поле ТПМ также невелика – отчетливо выраженные образования существуют не больше недели. В эти периоды пространственная корреляционная функция вейвлет-амплитуд в интервале масштабов 150 – 250 км представляет собой график слаботатухающей гармонической функции (рис. 11, *б*).



Р и с. 11. Зональный разрез по 43° с. ш.: *a* – вейвлет-спектр временного ряда дисперсии коэффициента пространственной корреляции поля ТПМ на масштабе 150 км; *б* – корреляционные функции вейвлет-амплитуд поля ТПМ того же масштаба

Аналогичные расчеты были выполнены для полей аномалий уровня поверхности моря. Данные для этих расчетов также были взяты с сайта [9]. Изменчивость пространственной корреляционной функции имеет те же характерные черты, что и рассмотренные нами ранее для полей хлорофилла *a* и температуры поверхности. На фоне практически постоянно присутствующих вихреволновых образований (связанных с ОЧТ) с масштабами 250 – 300 км периодически возникают и колебания с меньшими масштабами, ~ 150 – 170 км. Эти колебания наблюдаются как вдоль северной и южной границ исследуемой области, так и в ее центральной части.

З а к л ю ч е н и е. Таким образом, можно утверждать, что обнаруженные особенности изменчивости пространственной корреляционной функции связаны с вихреволновыми образованиями, проявляющимися в полях всех характеристик поверхностного слоя. Их пространственные масштабы охватывают интервал 100 – 230 км, время жизни – около недели. На протяжении полутора – двух месяцев может идти подряд несколько циклов, затем следует перерыв. Интервал времени между последовательными усилениями такой активности может колебаться от 3 до 7 мес. Возможные причины, обуславливающие наличие подоб-

ной изменчивости – меандрирование ОЧТ с образованием цепочек вихрей и низкочастотные волны. Представляет интерес дальнейшее изучение природы такого явления и причин, вызывающих его аperiodическое усиление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Старицын Д.К. и др. Изменчивость уровня северо-западной части Тихого океана. – СПб: СМИО Пресс, 2009. – 310 с.
2. 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) // Исследование Земли из космоса. – 2000. – № 1. – С. 3 – 14.
3. Каримова С.С., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М. Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // Там же. – 2011. – № 5. – С. 15 – 23.
4. Кушнир В.М., Станичный С.В. Индекс цвета в северо-западной части Черного моря по данным сканера MODIS // Там же. – 2007. – № 4. – С. 62 – 73.
5. Killworth P.D., Cipollini P., Uz B.M., Blundell J.R. Physical and biological mechanisms for planetary waves observed in satellite-derived chlorophyll // J. Geophys. Res. – 2004. – 109. – doi: 10.1029/2003JC001768.
6. Siegel D.A., Peterson P., McGillicuddy Jr.D.J. et al. Bio-optical footprints created by mesoscale eddies in the Sargasso Sea // Geophys. Res. Lett. – 2011. – 38, L13608. – doi: 10.1029/2011GL047660.
7. Васечкина Е.Ф. Реконструкция полей температуры поверхности по фрагментарным данным дистанционного зондирования // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 3. – С. 48 – 65.
8. Remote Sensing Department, Marine Hydrophysical Institute. – <http://dvs.net.ua>.
9. Ocean monitoring and forecasting. – <http://www.myocean.eu.org>.

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

Материал поступил
в редакцию 30.08.12
После доработки 04.01.13

АНОТАЦІЯ Вивчається синоптична і мезомасштабна просторово-часова мінливість полів у поверхневому шарі Чорного моря шляхом аналізу їх кореляційних функцій. Використовуються дані супутникового сканера MODIS, які попередньо оброблялися з метою заповнення пропусків. За цими даними уздовж обраних зональних і меридіональних розрізів будується вейвлет-спектр $W(a, b, t)$, а потім обчислюється автокореляційна функція вейвлет-коефіцієнтів для кожного з масштабів a_i . Аналіз показав, що просторово-часова мінливість цієї функції характеризується присутністю переміжних коливань у широкому діапазоні масштабів від 50 – 250 км і 10 – 200 діб. Найбільш яскраво проявляються коливання з просторовим масштабом 150 – 170 км і періодами 10 – 60 діб.

Ключові слова: вейвлет-аналіз, просторово-часова мінливість, хлорофіл a , супутникові дані.

ABSTRACT Synoptic and mesoscale spatial-temporal variability of the fields in the Black Sea surface layer is studied by analyzing their correlation functions. The satellite scanner MODIS data pre-processed with the aim of filling the gaps are used. According to these data the wavelet spectrum $W(a, b, t)$ is built along the selected zonal and meridional sections, and then the wavelet coefficients' autocorrelation function is calculated for each of the scales a_i . The analysis shows that spatial-temporal variability of this function is characterized by presence of intermittent fluctuations in a wide range of scales (50 – 250 km and 10 – 200 days). The most well-pronounced are the fluctuations with the spatial scale 150 – 170 km and the periods 10 – 60 days.

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