

УДК 551.466.8

© Г. В. Жегулин

Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН
gleb-jegulin@rambler.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ СВЯЗИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРООПТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В БЕЛОМ МОРЕ

Статья поступила в редакцию 09.06.2015 г., после доработки 17.12.2015 г.

Целью работы является отработка методики совместного статистического анализа пространственно-временной изменчивости данных гидрологических и гидрооптических наблюдений и степени их синхронизации с использованием вейвлет-анализа. Методика вейвлет-анализа позволяет выявлять в исследуемом сигнале нестационарные колебания, связанные с локальными кратковременными процессами в водной толще. Вейвлет-преобразование обеспечивает двумерную развертку одномерной реализации, при этом частота и время рассматриваются как независимые переменные. Это дает возможность анализировать множество одновременно в физическом и в спектральном пространстве. На основании экспериментальных данных, полученных в ходе проведения экспедиционных работ в августе 2013 г. в Белом море на границе Бассейна и пролива Западная Соловецкая Салма, проведен совместный статистический анализ пространственно-временной изменчивости температуры и показателя ослабления света в области слоя скачка на базе вейвлет-преобразования. Выделены основные энергонесущие колебания в диапазоне масштабов 1.5—3 и 5—8 ч. В указанных диапазонах выявлена высокая когерентность между вертикальными смещениями термоклина по данным температуры и показателя ослабления света. Показано, что рост показателя ослабления происходит с отставанием по фазе от температуры на 3—4 ч в пределах масштабов колебаний 5—8 ч и на 0.5—1 ч в диапазоне 1.5—3 ч. Колебания в указанных диапазонах можно идентифицировать как внутренние волны, а также регистрировать с помощью оптических средств. В результате проведенных исследований выявлено, что для пространственно-временной диагностики и оценки вклада колебаний температурного поля как индикатора внутреннего волнения в изменчивость гидрооптических характеристик предпочтительнее проводить анализ сигналов на основе временных рядов вертикальных смещений этих характеристик, т. к. распределение спектральных оценок по глубинам предоставляет только общую информацию о состоянии колебательной системы.

Ключевые слова: внутренние волны, температура, показатель ослабления света, вейвлет-преобразование, спектр, вейвлет-когерентность.

G. V. Zhegulin

Saint-Petersburg Department of the P.P.Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Russia

USING WAVELET ANALYSIS TO ASSESS THE RELATIONSHIP OF HYDROLOGICAL AND HYDROOPTICAL OSCILLATIONS IN THE RANGE OF INTERNAL WAVES ACCORDING TO IN SITU OBSERVATIONS IN THE WHITE SEA

Received 09.06.2015, in final from 17.12.2015.

The aim of the study is to develop a methodology of combined statistical analysis of spatial and temporal variability of hydrological and hydrooptical observations data and their synchronization rate using the wavelet analysis. The technique of the wavelet analysis allows to identify non-stationary fluctuations in the studied signal associated with local transient processes in the water column. The wavelet transform provides a two-dimensional scan of one-dimensional implementation, the frequency and time are considered as the independent variables. This gives the opportunity to analyze many things in physical and spectral space. On the basis of experimental data obtained during the expedition in August 2013 in the White Sea on the boundary of the Basin and the Strait Western Solovetsky Salma, a joint statistical analysis of spatial and temporal variability of temperature and indicator light attenuation in the layer jump based on wavelet transform is done. The basic energy-scale fluctuations in the range of 1.5—3 h and 5—8 h are indicated. High coherence

Ссылка для цитирования: Жегулин Г. В. Использование вейвлет-анализа для оценки связи гидрологических и гидрооптических колебаний в диапазоне внутренних волн по данным натурных наблюдений в Белом море // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 3. С. 48—56.

For citation: Zhegulin G. V. Using wavelet analysis to assess the relationship of hydrological and hydrooptical oscillations in the range of internal waves according to in situ observations in the White Sea. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 3, 48—56.

between the vertical displacement of the thermocline according to temperature and light attenuation index is revealed in these bands. An increase in the attenuation takes place with a lag phase of temperature by 3—4 h within the scope of oscillations 5—8 h and at 0.5—1 h, in the range of 1.5—3 h. Fluctuations in these ranges can be identified as internal waves and be registered by optical means. As a result of researches it is revealed that for the space-time diagnosis and evaluation of the contribution of fluctuations of the temperature field as an indicator of internal unrest in the variability of hydrooptical characteristics, it is preferable to make the analysis of signals based on time series of vertical displacements of these characteristics, because the distribution of the spectral estimates on depths only provides a general information about the state of the oscillating system.

Key words: internal waves, temperature, light attenuation spectrum, wavelet transform, spectrum, the wavelet coherence.

Согласно результатам численного моделирования внутренних волн (ВВ) [1] и данным спутниковых и контактных наблюдений [2, 3], мелководная часть шельфа вблизи пролива Западная Соловецкая Салма является главным районом возбуждения ВВ приливного периода и короткопериодных внутренних волн (КВВ) [2—4] высоких амплитуд. Поскольку шельфовый склон создает неоднородность для распространения длинных ВВ, а также при наличии слоя скачка температуры, пространственно-временная структура гидрологических полей в масштабе КВВ характеризуется значительной нестационарностью и мультимасштабностью [4]. Часто в натурных экспериментах на шельфе фиксируются колебания термоклина, далекие от описания их стандартными гармоническими функциями. Это накладывает ограничение на возможность применения традиционных методов классического спектрального и корреляционного анализа для исследования природных процессов в диапазоне ВВ. В этой связи особую значимость приобретает изучение данных наблюдений в виде пространственно-временных полей.

Цель данной работы заключалась в отработке методики совместного статистического анализа пространственно-временной изменчивости данных гидрологических и гидрооптических наблюдений и степени их синхронизации с использованием вейвлет-анализа. Выбор для этой цели спектрального анализа на базе вейвлет-преобразования является вполне актуальной в силу отсутствия практики применения этого математического аппарата для анализа внутренних волновых движений.

Настоящая работа имеет важные особенности, заключающиеся в использовании совместных высококоразрешающих контактных наблюдений в море, для которого отсутствуют систематические сведения подобной длительности и пространственно-временного разрешения. Подобные наблюдения обуславливают актуальность дальнейшего изучения процессов в масштабах ВВ в шельфовых районах морей, а также требуют применения нестандартных методов обработки результатов наблюдения в интересах решения научных и прикладных задач освоения океана. Применение нелинейного спектрального анализа предоставит нам принципиально новый взгляд на довольно сложную изменчивость и структуру взаимосвязи гидрооптических и гидрологических характеристик в пространственно-временном диапазоне.

Методика вейвлет-анализа позволяет выявлять в исследуемом сигнале нестационарные колебания, связанные с локальными кратковременными процессами в водной толще. Вейвлет-преобразование обеспечивает двумерную развертку одномерной реализации, при этом частота и время рассматриваются как независимые переменные. Это дает возможность анализировать множество одновременно в физическом и в спектральном пространстве.

Для анализа нестационарных сигналов хорошо подходит непрерывное вейвлет-преобразование [5, 6]. В качестве базисной функции использовался комплексный вейвлет Морле [6], который позволяет добиться лучшей локализации и оценить значение частот многокомпонентного сигнала с меньшей ошибкой, по сравнению с другими базисными вейвлетами.

Аналитическое представление вейвлета Морле задается следующим выражением [6, 7]:

$$W(a, b) = \frac{\pi^{-1/4}}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega_0 \frac{t-b}{a}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-b}{a} \right)^2} dt, \quad (1)$$

где $\omega_0 = 2\pi$ — частота плоской волны. Параметр « a » определяет размер вейвлета и называется *масштабом*. Параметр « b » задает временную локализацию вейвлета и называется *сдвигом*.

Результатом вейвлет-преобразования одномерного ряда является двумерный массив амплитуд вейвлет-преобразования $|W(a, b)|$, а величина $|W(a, b)|^2$ носит название *локального спектра энергии* или

скалограммы, которая позволяет проанализировать временную динамику передачи энергии процесса по масштабам. В противоположность этому величину

$$E_{\omega}(a) = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\infty} |W(a, b)|^2 db \quad (2)$$

называют *глобальным спектром энергии* или *скейлограммой* [6—8]. Глобальный спектр энергии есть плотность спектра энергии, сглаженная на каждом масштабе спектром Фурье анализирующего вейвлета [8]. Плотность распределения энергии в пространстве (a, b) позволяет найти локальные отклонения от спектра мощности на каждом временном масштабе, т. е. определить *меру локальной перемежаемости* процесса [8]

$$I_W(a, b) = \frac{E_W(a, b)}{E_W(a, b)_b}. \quad (3)$$

В качестве меры взаимосвязи сигналов применяется спектральная когерентность (вейвлет-когерентность) и фазовая синхронизация [6, 9, 10]. Когерентность представляет собой меру интенсивности сопряженной изменчивости двух последовательных временных реализаций в частотно-временном пространстве.

Показателем тесноты связи между гармоничными составляющими на различных частотах для текущего момента времени является функция когерентности $R^2(a, b)$, которая определяется как отношение оценки модуля взаимного вейвлет-спектра к произведению оценок индивидуальных вейвлет-спектров обоих рядов. Согласно [9], когерентность рассчитывается как

$$R^2(a, b) = \frac{|S(a^{-1}W_{xy}(a, b))|^2}{S(a^{-1}|W_x(a, b)|^2) S(a^{-1}|W_y(a, b)|^2)}, \quad (4)$$

где S — сглаживающий оператор [10]. Когерентность интерпретируется как квадрат коэффициента корреляции, и ее значения варьируются в интервале от 0 до 1.

Преобразование с использованием вейвлета Морле также предоставляет возможность получить распределение разностей фаз

$$\varphi_{xy}(a, b) = \arctg \frac{\text{Im}(W_{xy}(a, b))}{\text{Re}(W_{xy}(a, b))}, \quad (5)$$

что позволяет судить о степени синхронизации сигналов при наличии временной задержки между ними.

Результаты расчетов и их обсуждение. Материалы для работы были получены с 20 по 21 августа 2013 г. в мористой части прол. Западная Соловецкая Салма Белого моря на границе с Бассейном. Глубина места составляла 30 м. Наблюдения проводились с заякоренного судна в течение 9.5 ч. Выполнялось сканирование водной толщи от поверхности до дна гидрологическим зондом CastAway-CTD и погружаемым измерителем показателя ослабления света [11]. Один «спуск» и «подъем» занимали от 1 до 2 мин. Зондирование водной толщи производилось каждые 10 мин гидрооптическим зондом и в непрерывном режиме регистрации гидрологическим. В дальнейшем, для каждого глубинного горизонта были сформированы ряды колебаний температуры ($^{\circ}\text{C}$) и показателя ослабления света ($c, \text{м}^{-1}$) (рис. 1) с дискретностью по глубине 0.5 м, а по времени — 10 мин. С полученных пространственно-временных разрезов снималась глубина залегания изотермы, соответствующей середине слоя термоклина. В качестве среднего положения термоклина выбрана изотерма $T(z) = 10^{\circ}\text{C}$ и показатель ослабления света $c(z) = 0.85 \text{ м}^{-1}$. Спектральные характеристики оценивались на основе вейвлет-преобразования временных рядов глубин залегания этих величин.

На рис. 2 представлены в графическом виде коэффициенты $W(a, b)$: по оси абсцисс отложены сдвиги вейвлета (ось времени), по оси ординат — масштабы. Получившееся изображение называют *вейвлет-изображением*, на котором видны все его характерные особенности: масштаб и интенсивность периодических изменений, наличие, расположение и длительность областей, соответствующих повышенным значениям вейвлет-коэффициентов. Колебания на вейвлет-изображении выглядят как цепочка «холмов», имеющих «вершины» на масштабе, соответствующем частоте колебаний и расположенные

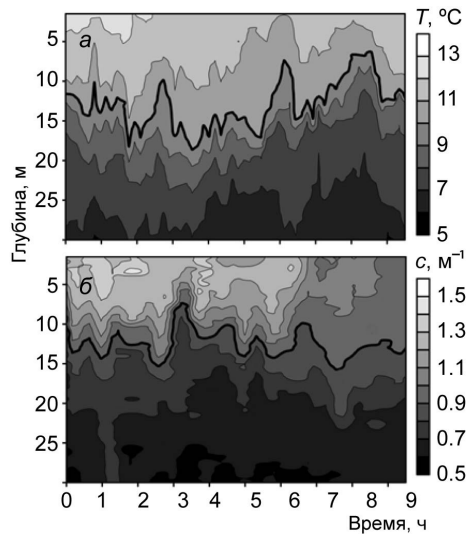


Рис. 1. Временная изменчивость температуры (а) и показателя ослабления света (б) в течение 9.5 ч с шагом по времени 10 мин по данным сканирования в прол. Западная Салма. Линия — среднее положение термоклина по данным глубин залегания изотермы $T(z) = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$ (б).

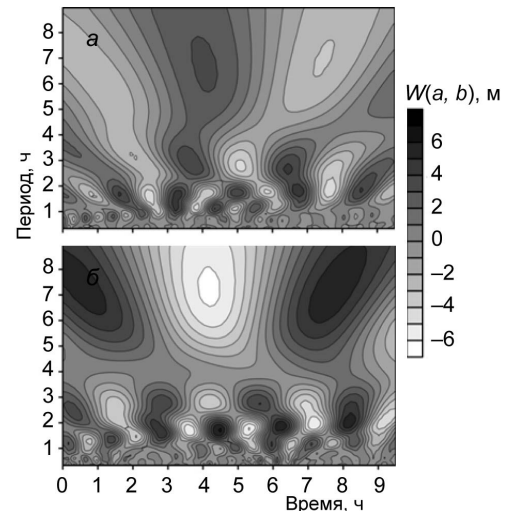


Рис. 2. Амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования вертикальных смещений термоклина по данным глубин залегания показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$ (а) и изотермы $T(z) = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б).

в точках (по оси времени), в которых эти изменения достигают наибольших значений (соответственно, «дно» впадин между холмами приходится на точки наименьшего значения колебаний). Расстояние между вершинами или впадинами холмов равно периоду колебаний.

Из рис. 2 видно, что в течение всего исследуемого процесса колебания находятся практически в одних и тех же диапазонах временных масштабов: 1—3 и 5—8 ч. В данных диапазонах локальные особенности отображены в виде, преимущественно, систематического характера чередующихся выбросов, т. е. налицо квазипериодичность процесса. Причем более высоким значениям энергии соответствуют коэффициенты вейвлет-преобразования колебаний термоклина по данным температуры (рис. 2, б). Смещение относительно вертикали изотермической поверхности превышают вертикальные смещения по данным показателя ослабления, о чем говорит рис. 3, б, на котором диапазон 5—8 ч расположен в зоне статистической значимости (обведен жирным контуром). Его появление связано как с присутствием в исследуемых временных реализациях нелинейной трендовой составляющей, соизмеримой с длиной исходного ряда, так и с возмущениями, лежащими в области очень больших временных масштабов (7—8 ч) вблизи вершины конуса влияния. Поэтому, статистический вклад диапазона 5—8 ч в спектральную структуру процесса может быть завышен, т. к. в силу малости длины анализируемого ряда и недостаточно высокой дискретности пришлось дополнить ряд нулями до длины $5N$ с целью уменьшения ошибки граничных эффектов [5, 12]. На обоих спектрах (рис. 3) 1–3-часовой масштаб статистически значим большую часть времени.

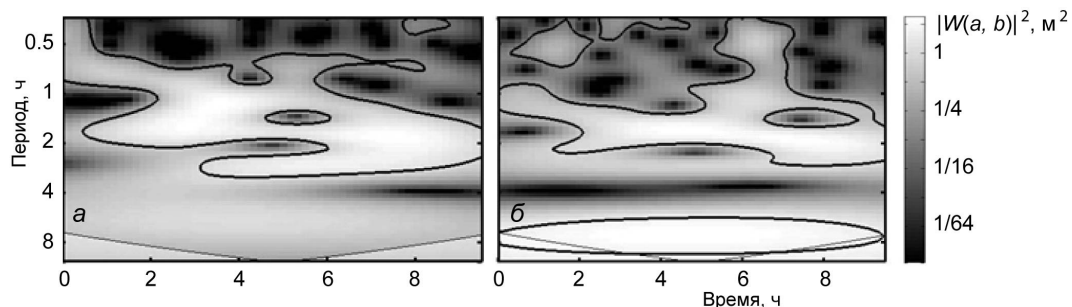


Рис. 3. Локальные вейвлет-спектры мощности колебаний термоклина по данным глубин залегания показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$ (а) и изотермы $T(z) = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б). Линиями показан 95 %-ный уровень статистической значимости по отношению к красному шуму.

На рис. 4 показаны спектры мощности (эволюция распределение волновой энергии по временным масштабам), рассчитанные по коэффициентам вейвлет-преобразования рядов вертикальных смещений исследуемых характеристик в области термоклина. Вейвлет-преобразование, в отличие от преобразования Фурье, показывает правильное соотношение между энергетическими составляющими ряда, поскольку поглощение несуществующих (ложных) энергетических уровней сглаженным на каждом временном масштабе спектром Фурье комплексного вейвлета осуществляется благодаря учету энергетической составляющей каждой индивидуальной особенности локального спектра энергии в процессе свертки по всей длине реализации.

Из рис. 4 видно, что максимумы глобальных спектров достигаются на периодах 100 (~1.5 ч), 115 (~2 ч) и 165 (~3 ч) мин, а также на периоде 8 ч по данным температуры и на периоде 6.5 ч по данным показателя ослабления. Последний является следствием присутствия длиннопериодной гармоник со слабо выраженной компонентой вертикального смещения, что и объясняет его нахождение в зоне незначимости. Если пик в спектре превышает 95 %-ную доверительную границу, то можно предположить, что он является статистически значимым с вероятностью 95 %. Как видно из рисунка, в рядах показателя ослабления в области термоклина присутствует, судя по расположению основных максимумов и минимумов в обоих спектрах, волновая составляющая.

Максимумы на обоих спектрах расположены выше доверительного уровня в диапазоне 1.5–2 ч, что является следствием их наиболее значимого, по сравнению с остальными временными масштабами, совместного энергетического вклада в колебательную структуру процесса в глобальном представлении.

На рис. 5 приведены автокорреляционные функции (АКФ) для временных рядов температуры и показателя ослабления. Радиус корреляции равен 3–4 временным сдвигам (30–40 мин). Из рис. 5 видно, что в обоих анализируемых рядах присутствует периодическая составляющая продолжительностью около 2 ч, которая присутствует в спектрах мощности (рис. 4) в виде пиков, превышающих уровень значимости.

Непериодические интенсивные осцилляции сигнала, а также их временная протяженность легко обнаруживаются при расчете отклонений от усредненного энергетического поля плотности сигнала (от спектра мощности). На рис. 6 изображена мера локальной перемежаемости, определяемая через плотность энергии.

Равенство $I_w(a, b) = 1$ означает, что энергия распределена равномерно и все локальные спектры одинаковы. Из рис. 6 видно, что в пределах регулярной структуры колебаний, преимущественно в диапазоне 1.5–3 ч, энергия распределена относительно равномерно ($I_w(a, b) \leq 2$) при всех a и b соответственно. Выражаясь иными словами, энергетическая составляющая гармоник в рассматриваемом диапазоне (рис. 3) на всем исследуемом временном промежутке, в целом, равнозначна. Асинхронное поведение демонстрируется лишь в диапазоне 1–1.5 ч (рис. 5), где вклад компонент масштаба данного диапазона на отдельных временных промежутках может превосходить усредненный по всем « b » в 3–4 раза.

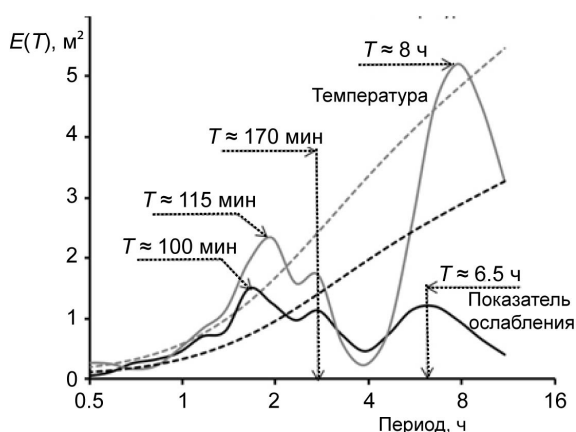


Рис. 4. Глобальные вейвлет-спектры мощности колебаний термоклина по данным вертикальных смещений изотермы $T(z) = 10^\circ\text{C}$ и показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$, нормированные на дисперсию.

Пунктиром отмечены 95 %-ные уровни значимости по отношению к красному шуму.

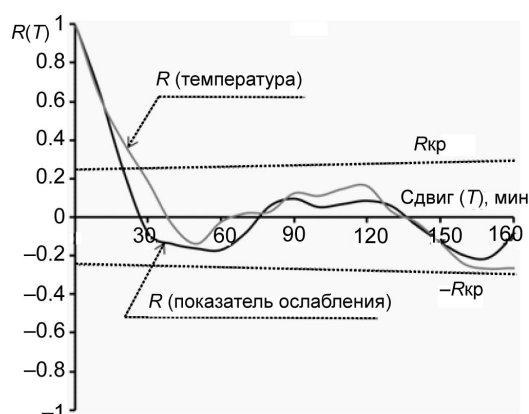


Рис. 5. Автокорреляционные функции колебаний термоклина по данным вертикальных смещений изотермы $T(z) = 10^\circ\text{C}$ и показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$.

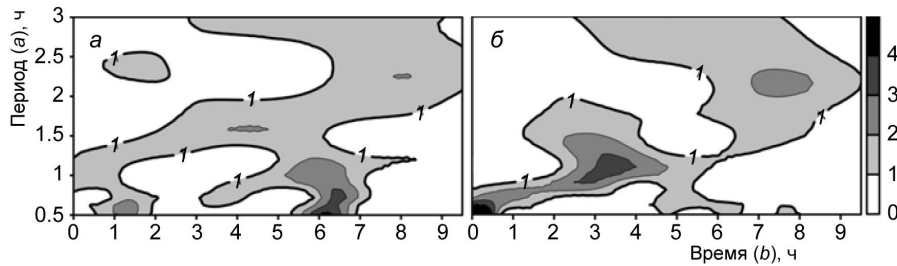


Рис. 6. Мера локальных отклонений от глобального вейвлет-спектра мощности в диапазоне масштабов 0.5—3 ч по данным глубины залегания изотермы $T(z) = 10\text{ °C}$ (а) и показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$ (б).

С целью анализа сопряженной изменчивости, определении степени пространственно-временной синхронизации и оценки статистической взаимосвязи между колебаниями термоклина и вертикальной компонентой смещения показателя ослабления света производится расчет вейвлет-когерентных спектров (рис. 7).

Стрелки на рисунке показывают относительную фазу колебания: $\rightarrow$ колебания находятся в фазе; $\leftarrow$ колебания находятся в противофазе; $\downarrow$ ряд X опережает ряд Y на 90° ; $\uparrow$ ряд Y опережает ряд X на 90° . Стоит иметь в виду, что интерпретация, фазы, к примеру, как лидирующей, должна выполняться с осторожностью. Опережение на 90° можно также интерпретировать как отставание на 270° или отставание на 90° , но в антифазе (противоположного знака). Желательно владеть начальной информацией о направлении запаздывания или отклика колебательной системы. Для представленных спектрограмм вейвлет-когерентности характерны следующие особенности:

- высокий коэффициент когерентности (свыше 0.8) в диапазоне 1.5—3 ч и свыше 5 ч;
- наблюдается вспыхивающий по времени характер когерентности в диапазоне масштабов 20—30 мин и продолжительностью 30—90 мин, что говорит об образовании временных когерентных структур. Также не исключается случайный характер высокой когерентности на малых временных масштабах.

— расширение области когерентности в сторону низких или высоких частот практически не происходит, т. е. диапазон масштабов с высокими коэффициентами когерентности с течением времени не меняется. Протяженность зоны повышенной когерентности может достигать длины анализируемого сигнала (для низкочастотного диапазона).

Частотно-временная зона, лежащая вне области с вейвлет-когерентностью, отличной от нуля на уровне значимости 5 %, не является надежным показателем причинности. Уменьшение значений когерентности может быть вызвано следующими причинами: присутствием некоррелированных шумов в сигналах, определяющих нестабильность фазы кросс-вейвлет спектра во времени; наличием нелинейной связи между процессами; утечкой мощности, определенной недостаточным разрешением

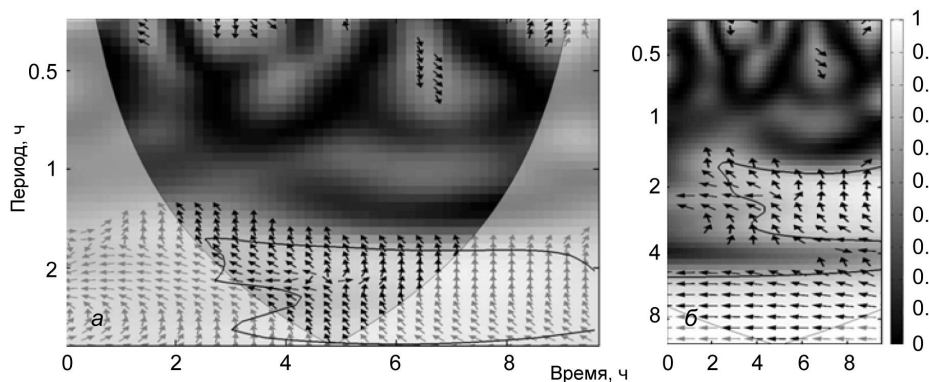


Рис. 7. Вейвлет-когерентность колебаний термоклина по данным глубин залегания показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$ (X) с вертикальным смещением изотермы $T(z) = 10\text{ °C}$ (Y).

Линии отделяют области краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области с вейвлет-когерентностью, отличной от нуля на уровне значимости $p = 95\%$ по отношению к красному шуму. Для уменьшения влияния краевых эффектов ряды дополнялись нулями до длины $3N$ (б).

по частоте или недостаточно длительным интервалом наблюдения; наличием временной задержки при передаче взаимодействия между двумя процессами, соизмеримой с интервалом наблюдения.

В результате проведенных расчетов выявлена статистически значимая закономерность между колебаниями температуры, которые являются индикатором внутреннего волнения, и показателем ослабления света в диапазоне масштабов 1.5—3 и 5—8 ч. Область значимости растянута во времени, размах когерентности в низкочастотном диапазоне не велик и составляет 0.8—1.0, что указывает на практически линейную взаимосвязь (с линейным откликом колебательной системы) между изменением во времени показателя ослабления и ВВ.

Разность фаз в диапазоне 1.5—3 ч для статистически значимых областей составляет 90—135°. Стрелки направлены на север, северо-запад, что означает опережение гребня ВВ в среднем на 30—60 мин в зависимости от масштаба. На спектре мощности (рис. 4) показано, что колебания с периодами 1.5—3 ч присутствуют в обоих сигналах, т. е. волновой процесс отражается на изменчивости во времени показателя ослабления с задержкой от 30 мин до 1 ч.

В длинноволновом диапазоне масштабов (рис. 7, б) прослеживается отчетливый квазилинейный отклик системы с коэффициентами когерентности свыше 0.9 в течение всего промежутка времени. Стрелки направлены преимущественно на запад, колебания находятся в противофазе. Иными словами, рост показателя ослабления происходит с отставанием по фазе от вертикальных смещения изотермической поверхности в области термоклина примерно на 3—4 ч в пределах низкочастотного диапазона масштаба.

В заключение, на основе результатов многократного зондирования приводятся картины распределения спектрального состава температуры и показателя ослабления света по глубине. На рис. 8, а можно проследить изменение интенсивности изолиний спектральной плотности по глубине и по времени, описывающие структуру поля внутренних волн или границы волновода. Чем «темнее» цвет, тем мощнее вертикальный градиент температуры $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{t=t_0}$ и изменчивость температуры во времени $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{z=z_0}$. Иными словами, рост спектральной плотности температурных неоднородностей указывает на усиление стратифицированности среды, следовательно, на увеличение влияние внутренних волн на формирование температурного режима.

Из рис. 8, а видно, что толщина волновода составляет примерно 15 м и с течением времени остается фактически неизменной. В течение последних 4—5 ч наблюдается подъем волновода к поверхности примерно на 5 м. Что же касается спектра показателя ослабления (рис. 8, а — нижний), то видно, что энергия наиболее интенсивных колебаний сосредоточена в верхнем 15-метровом слое в области с минимальными

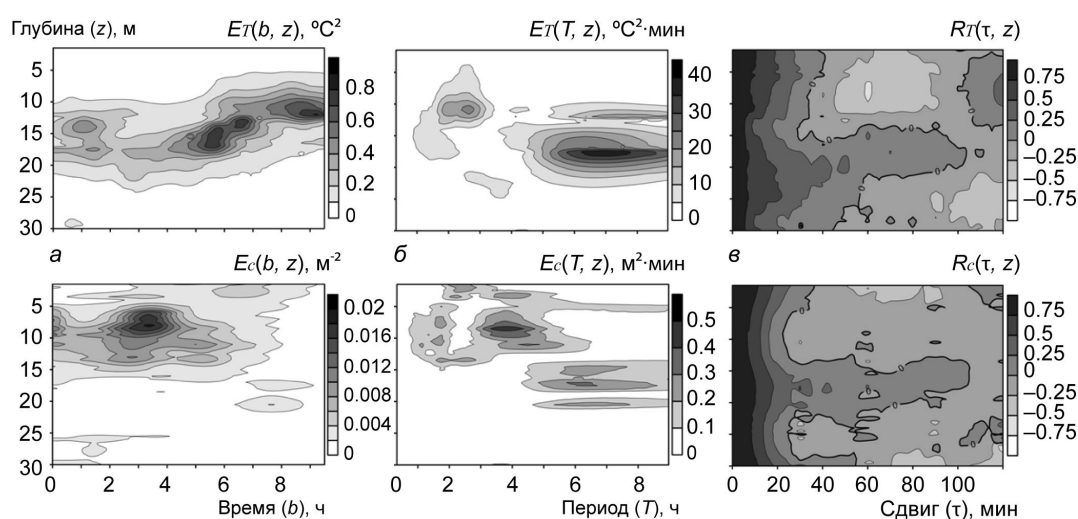


Рис. 8. Спектральный состав временных рядов температуры и показателя ослабления света в зависимости от глубины.

а — усредненный по временным масштабам локальный вейвлет-спектр энергии сигналов (17); б — глобальный вейвлет-спектр (спектр мощности); в — АКФ временных рядов температуры и показателя ослабления.

Верху температура, внизу показатель ослабления света.

величинами вертикальных градиентов температуры, что свидетельствует в пользу рассинхронизации этих колебательных процессов во времени и в пространстве. Обращает на себя внимание ярко выраженный максимум между 2-м и 4-м часом в слое 5—10 м на временном вейвлет-спектре показателя ослабления. На рис. 9 представлен спектр локальных отклонений от спектра мощности, из которого видно, что это кратковременное колебание высокой интенсивности расположено в диапазоне масштабов 20 мин — 1.5 ч. На вертикальном распределении спектра мощности (рис. 8, б — нижний), видим, что данное колебание не проявляется в глобальном представлении. Соответственно, максимум спектральной плотности в рядах показателя ослабления (рис. 8, б — нижний), приходящийся на диапазон 3—4 ч в верхнем 10-метровом слое относится к квазигармонической компоненте ряда с равномерно распределенной энергией на всей временной последовательности, и мера локальных отклонений для этого диапазона (рис. 9) явное этому подтверждение. Обратим также внимание, что данный колебательный процесс протекает вне границ волновода и в спектре колебаний температуры (рис. 8, б — верхний) не проявляется.

Схожая картина локализации максимумов на вертикальном разрезе глобального спектра мощности температуры и показателя ослабления относится к квазистационарному процессу с периодичностью от 5 ч и более в слое 15—20 м (рис. 8, б). Это указывает на то, что колебания термоклина в низкочастотном диапазоне масштабов проявляются в структуре изменчивости показателя ослабления. На фоне стационарных процессов в низкочастотной зоне кратковременных колебаний высокой интенсивности не выявлено, о чем нам сообщает распределение в пространственно-временных координатах меры локальных отклонений от спектра мощности (рис. 6 и 9), следовательно, энергия колебаний здесь будет распределена равномерно в течение всего периода наблюдений.

На присутствие низкочастотной составляющей квазигармонического процесса в слое 15—20 м в обоих спектрах (рис. 8, б) указывает вид АКФ (рис. 8, в). В диапазоне этих глубин четко прослеживается преобладающая инерционная компонента обоих процессов в виде вытянутых вдоль оси временных сдвигов максимальных значений АКФ с радиусом корреляции свыше 1.5 ч, содержащая значительную энергию.

В результате проведенных исследований выявлено, что для пространственно-временной диагностики и оценки вклада колебаний температурного поля как индикатора внутреннего волнения в изменчивость гидрооптических характеристик предпочтительнее проводить анализ сигналов на основе временных рядов вертикальных смещений этих характеристик, т. к. распределение спектральных оценок по глубинам предоставляет только общую информацию о состоянии колебательной системы.

Колебания термоклина по данным вертикальных смещений изотермы $T(z) = 10^\circ\text{C}$, описывающей структуру поля ВВ, находят отклик в данных глубины залегания показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$ в диапазоне масштабов 1.5—3 и 5—8 ч. Обнаружена тесная взаимосвязь с коэффициентами когерентности свыше 0.8 между показателем ослабления света и ВВ в диапазоне периодов 1.5—3 и 5—8 ч, что указывает на практически линейную зависимость между процессами. Колебания в указанных диапазонах обладают значительным энергетическим потенциалом. Согласно результатам взаимного спектрального анализа, их можно идентифицировать, как внутренние волны, а также регистрировать с помощью оптических средств.

Рост показателя ослабления в области термоклина происходит с отставанием по фазе от колебаний температуры примерно на 3—4 ч в пределах низкочастотного диапазона масштаба и на 0.5—1 ч в диапазоне масштабов 1.5—3 ч.

Данная работа частично была выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 15-05-04639_а.

Литература

1. Каган Б. А., Тимофеев А. А. Динамика и энергетика поверхностных и внутренних полусуточных приливов в Белом море // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2005. Т. 41, № 4. С. 844—850.

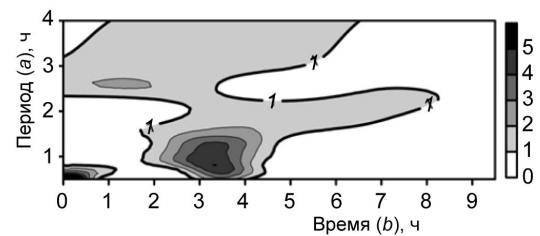


Рис. 9. Мера локальных отклонений от глобального вейвлет-спектра мощности в диапазоне масштабов 0.5—4 ч по данным показателя ослабления света на глубине 7 м.

2. Зимин А. В., Жегулин Г. В., Козлов И. Е., Мясоєдов А. Г., Мохнаткин Ф. Ю., Коноплев А. В. Исследование короткопериодных внутренних волн в Белом море по данным контактных и спутниковых наблюдений // Морские берега — эволюция, экология, экономика: Материалы XXIV Международной береговой конференции, посвященной 60-летию со дня основания Рабочей группы «Морские берега». Туапсе, 1—6 октября 2012 г. Т. 1. Краснодар: Издательский Дом — Юг, 2012. С. 173—176.
3. Зимин А. В., Родионов А. А., Здоровеннов Р. Э., Романенков Д. А., Шевчук О. И., Родионов М. А., Жегулин Г. В. Экспедиционные исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в белом море в июле-августе 2012 года с научно-исследовательского судна «Эколог» // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 3. С. 85—88.
4. Зимин А. В., Родионов А. А., Жегулин Г. В. Короткопериодные внутренние волны на шельфе Белого моря: сравнительный анализ наблюдений в различных районах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6, № 3. С. 19—33.
5. Короновский А. А., Храмов А. Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 176 с.
6. Torrence C. A Practical Guide to Wavelet Analysis / C. Torrence, G. P. Compo // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. V. 79. P. 61—78.
7. Витязев В. В. Вейвлет-анализ временных рядов. Учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2001. 58 с.
8. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145—1170.
9. Torrence C., Webster P. Interdecadal Changes in the ENSO Monsoon System // J. Clim. 1999. V. 12. P. 2679—2690.
10. Jevrejeva S., Moore J. C., Grinsted A. Influence of the Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach // J. Geophys. Res. 108(D21), 4677, doi:10.1029/2003JD003417, 2003.
11. Левин И. М., Родионов М. А., Французов О. Н. Погружаемый измеритель показателя ослабления света морской водой // Оптический журн. 2011. № 5. С. 59—63.
12. Addison P. S. Illustrated wavelet transform handbook. Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance / Paul S. Addison. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2002. 400 p.