

УДК 551.466.8

© Г. В. Жегулин

Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва
jegulin-bleb@rambler.ru

ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ГЛУБОКОВОДНОМ РАЙОНЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Статья поступила в редакцию 20.06.2018, после доработки 14.11.2018.

На основании данных натурных наблюдений, полученных в период проведения экспериментальных работ в августе 2016 г. в глубоководном районе Баренцева моря ниже критической широты для полусуточного прилива, выполнен статистический анализ временной изменчивости температуры и показателя ослабления света в границах слоя скачка. Выделены основные черты поля короткопериодных внутренних волн). В районе преобладает внутреннее волнение высотой 1—2 м и периодом 10—20 мин, которое составляет примерно 45 % от общего числа наблюдений. Периоды 40 % зарегистрированных волн — 20—60 мин. Внутренние волны с периодом свыше 20 мин имеют длину от 500 м и более, а фазовую скорость — 40—45 см/с. Хорошо выраженных, соответствующих критериям интенсивных внутренних волн, цуговых систем за все время проведения работ не наблюдалось. Выделены статистически значимые глобальные временные масштабы вертикальных смещений термоклина, равные 20 и 40 мин. В фазу отлива в диапазоне периодов внутренних волн 25—50 мин происходит единовременное взаимное усиление колебаний термоклина по данным температуры и показателя ослабления света, которое приходится на сизигию в период максимума. Установлено, что в диапазоне 20—60 мин имеет место синхронная взаимосвязь между колебаниями температуры и показателя ослабления света с когерентностью свыше 0.9. Столь высокое значение когерентности является достаточным обоснованием применения контактных и дистанционных оптических средств измерений для регистрации в глубоководных районах Баренцева моря внутреннего волнения в диапазоне 20—60 мин. Колебания термоклина с периодами менее 20 мин проявляются в виде нерегулярных когерентных структур с фазовой нестабильностью и поэтому не могут служить надежным индикатором поля короткопериодных внутренних волн по результатам только лишь оптических наблюдений.

Ключевые слова: Баренцево море, короткопериодные внутренние волны, температура, показатель ослабления света, статистическая значимость, кросс-вейвлет спектр, вейвлет-когерентный спектр.

G. V. Zhegulin

P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ESTIMATION OF THE STATISTICAL COMMUNICATION OF HYDROLOGICAL AND HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS FROM THE DATA OF MEASUREMENT OF SHORT-PERIOD INLAND WAVES IN THE DEEP-BORDER REGION OF THE BARENTS SEA

Received 20.06.2018, in final form 14.11.2018.

Based on the field observations obtained during the experimental work in August 2016 in the deep-water region of the Barents Sea below the critical latitude for the semi-diurnal tide, a statistical analysis of temporal temperature variability and light attenuation indicator at the boundaries of the jump layer was performed. The main features of the field of short-period internal waves are highlighted. The region is dominated by internal waves with a height of 1 to 2 m and a period

Ссылка для цитирования: Жегулин Г. В. Оценка статистической взаимосвязи гидрологических и гидрооптических характеристик по данным измерения короткопериодных внутренних волн в глубоководном районе Баренцева моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 1. С. 85—94.

For citation: Zhegulin G. V. Estimation of the statistical communication of hydrological and hydrooptical characteristics from the data of measurement of short-period inland waves in the deep-border region of the Barents Sea. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 1, 85—94.

doi: 10.7868/S2073667319010106

of 10 to 20 minutes, which is approximately 45 % of the total number of observations. 40 % of registered waves have periods from 20 to 60 minutes. Explosives with a period of more than 20 min have a length of 500 m and more, and a phase velocity of 40—45 cm/s. Well-pronounced, consistent with the criteria of intense internal waves, a train system for the entire period of work was not observed. Statistically significant global time scales of vertical displacements of the thermocline equal to 20 and 40 min were identified. In the ebb phase, in the range of periods of internal waves of 25—50 min, a one-time mutual amplification of thermocline oscillations takes place according to the temperature and light attenuation index, which falls on the syzygy during the maximum period. It has been established that in the range of 20—60 min there is a synchronous relationship between temperature fluctuations and the attenuation coefficient of light with a coherence above 0.9. Such a high coherence value is a sufficient justification for the use of contact and remote optical measuring instruments for recording internal waves in the deep-water areas of the Barents Sea in the range of 20 to 60 minutes. Vibrations of a thermocline with periods of less than 20 min manifest themselves in the form of irregular coherent structures with phase instability, and therefore cannot serve as a reliable indicator of the field of short-period internal waves based on the results of optical observations only.

Keywords: Barents Sea, short-period internal waves, temperature, light attenuation, statistical significance, cross-wavelet spectrum, wavelet-coherent spectrum.

Ранее в работе [1] уже упоминалось о преимуществах применения локализованного спектрального вейвлет-анализа в задачах изучения короткопериодных процессов в водной среде [1, 2]. Вейвлет-анализ позволяет не только оценивать частотную динамику исследуемого сигнала в случае нестационарного процесса, но и выделять когерентные структуры. Возможность одновременно при сопоставлении рядов изучать и пространственную, и частотную картину их эволюции, а также проводить совместный кросс-анализ является существенным достоинством метода. Результаты исследования могут определить подходящее применение методологии вейвлет-анализа как раскрытие вейвлет-когерентности между изучаемыми рядами данных в качестве инструмента визуализации сложных физических процессов в морской среде. Особенно важно его применение для районов Мирового океана с сильной дисперсией параметров гидрофизических полей. В этом случае необходимо находить корреляции между локальными особенностями характеристик морской среды, частотный состав которых в процессе их распространения может претерпевать значительные изменения.

Данная работа является продолжением изучения локальной изменчивости гидрооптических характеристик в диапазоне внутренних волн (ВВ), только на основе данных более частых измерений с временным интервалом 1 мин, чем представленных в работе [1], где дискретность информации во времени составляла 10 мин. Это позволит наиболее детально изучить колебательную структуру слоя скачка в диапазоне наименее исследованной, короткопериодной области ВВ (периоды от 1 ч и менее).

Представлены результаты исследования характеристик короткопериодных внутренних волн (КВВ) в глубоководном районе Баренцева моря на 50 км северо-восточнее о. Харлов. Выбор Баренцева моря в качестве объекта исследования обусловлен тем, что шельфовый склон здесь, как и в Белом море [3], создает неоднородность для распространения длинных ВВ, а также при наличии слоя скачка температуры, пространственно-временная структура гидрологических полей в масштабе КВВ характеризуется нестационарностью и мультимасштабностью. Баренцево море практически все является шельфовым, поэтому здесь можно ожидать относительно однородный характер поля ВВ по всей акватории [4, 5].

Экспедиционные наблюдения [5] позволили выявить, что в прибрежной зоне около Мурманского берега Кольского полуострова имеет место следующий механизм генерации: в этом районе КВВ генерируются сильными приливными течениями, взаимодействующими с неровностями дна у островов и береговой черты [6]. В данном районе также могут возникать интенсивные КВВ, которые проявляются при переходе от большой воды к малой. Здесь, как и в Белом море, внутренние приливные волны диссипируют, порождая короткопериодные.

Задача о возможной взаимосвязи гидрооптических, в частности показателя ослабления света в морской среде, и гидрологических характеристик рассматривалась во многих работах (см., например, [7, 8]). Но в них изучался лишь вопрос о возможной линейной корреляционной взаимосвязи параметров вертикальных профилей показателя ослабления и гидрологических характеристик морской воды. Стоит добавить, что распределения по глубине показателя ослабления света и гидрологических характеристик являются зависимыми, поскольку светорассеивающие свойства морской воды определяются, в основном, взвешенными органическими и минеральными веществами, а распределение взвеси по вертикали тесно связано с плотностью воды.

В работе [9] рассчитывались коэффициенты корреляции непосредственно между горизонтом максимального изменения показателя ослабления и глубиной залегания пикноклина. Коэффициент корреляции в прибрежных районах Баренцева моря достигал 0.8—0.9 для районов с неглубоким залеганием скачка плотности (20—50 м) и уменьшался с его заглублением. Проведенные расчеты указали на возможность регистрации ВВ дистанционными оптическими средствами, в частности, лидаром [10].

В настоящее время в литературе отсутствуют сведения о совместных высокоразрешающих контактных измерениях гидрофизических и гидрооптических параметров в шельфовых морях, что может являться обоснованием для дальнейшего проведения аналогичных исследований с целью использования оптических средств измерений для регистрации КВВ.

Вопрос о возможной связи гидрологических параметров и показателя ослабления света в частотно-временном окне рассматривался только в работе [1], где представлены результаты обработки всего лишь одного эпизода сканирования в беломорском проливе Западная Соловецкая Салма. Тогда была обнаружена высокая взаимосвязь между показателем ослабления света и колебанием слоя скачка по данным температуры в диапазоне временных масштабов 1.5—3 и 5—8 ч и фазовым сдвигом 1.5—4 ч. Взаимосвязь на более высоких частотах не выявлена, скорее всего, вследствие низкой дискретности временных реализаций и однократности наблюдений. Поэтому в настоящей работе была поставлена цель оценить меру локальной взаимосвязи и степень фазовой синхронизации между гидрооптическими и гидрофизическими параметрами морской среды с привязкой к фазе приливного цикла на основании нескольких эпизодов сканирования и дать дополнительное обоснование к применению контактных и дистанционных средств измерения гидрооптических характеристик для определения параметров ВВ с периодами менее 60 мин.

Описание методики и исходных данных. Измерения ВВ в Баренцевом море были проведены с 12 по 20 августа 2016 г. с судна, находящегося в дрейфе. Глубины в районе проведения работ составляли 150—170 м. Выполнялось вертикальное зондирование (сканирование) водной толщи в диапазоне глубин 10—45 м в непрерывном режиме регистрации. Контроль гидрофизических характеристик осуществлялся методом прямых измерений с помощью STD-зонда SBE-25 (США) с оптическими датчиками, измеряющими показатель ослабления света в морской воде. Общая продолжительность наблюдений, состоящих из 9 сканирований, составила примерно 45 ч. Длительность каждого сканирования — 4.5—5.5 ч. Один цикл сканирования «спуск-подъем» зонда занимал 1 мин.

Строение вод в районе проведения исследований имеет четкую трехслойную структуру: верхний перемешанный слой (мощность слоя составляет 10—15 м), затем слой скачка, толщиной до 10 м, и глубоководный квазиоднородный слой (рис. 1).

Метеорологические условия, в основном, благоприятствовали проведению работ, волнение не превышало двух баллов. Исключением являлся период с 15 по 17 августа, когда произошло усиление ветра до 10—15 м/с. Сильный дрейф и волнение, наблюдавшиеся в этот период, осложняли измерения. Интенсификация течений была связана с прохождением над районом работ атмосферного фронта. Из рассмотрения были исключены записи за эти дни ввиду существенной разницы между частотами ожидаемых и измеряемых колебаний термоклина, именуемой доплеровским смещением. Поэтому расчеты параметров ВВ были проведены только для 6-ти эпизодов сканирований.

Для каждого глубинного горизонта были сформированы временные ряды колебаний температуры и показателя ослабления света с дискретностью по глубине 0.5 м, а по времени — 1 мин. С полученных пространственно-временных разрезов снимались глубины залегания изотермы и изолинии показателя ослабления света, соответствующих середине слоя термоклина. Вариации положения термоклина во времени позволяют определять параметры ВВ (высоту, период, длину, а также фазовую скорость) по методике, подробно изложенной в [12]. Высота волны оценивалась как средняя величина между вертикальными размерами переднего и заднего ее склона, а период каждой волны — как временной интервал между соседними минимумами залегания изотермы.

Для анализа временных рядов глубин залегания этих величин использовалось непрерывное вейвлет-преобразование [13, 14]. В качестве базисной функции использовался комплексный вейвлет Морле [14], так как это обеспечивает хороший баланс между временем и частотой. В этом случае частотный масштаб вейвлета соответствует Фурье частотам. Для количественной оценки линейной взаимосвязи между изменением температуры и показателя ослабления был применен взаимный спектральный

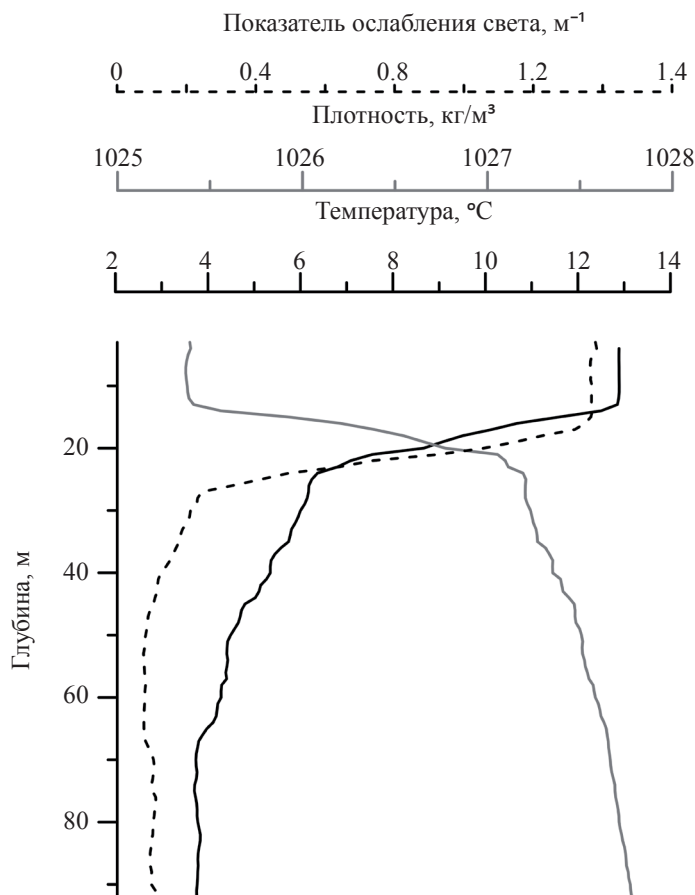


Рис. 1. Зависимость температуры, плотности и показателя ослабления света от глубины в месте наблюдения ВВ.

Fig. 1. The dependence of temperature, density and light attenuation index on the depth at the point of observation of explosives.

анализ [15]. В качестве меры анализа локальной взаимосвязи между временными последовательностями применялась вейвлет-когерентность, которая позволяет вычислить корреляцию двух временных рядов в области времени-частоты [1, 16].

Наглядное представление о характерной временной изменчивости в районе проведения работ профилей температуры и показателя ослабления света можно получить из рис. 2. Температура у поверхности моря составляла 12—13 °C, а на 45 м — уже 3—4 °C. Вертикальный градиент температуры в слое скачка достигал 1.5 °C/м. Показатель ослабления света убывал с глубиной от 1.3 у поверхности до 0.1 на глубине 45 м. Хорошо выраженных, соответствующих критериям интенсивных ВВ [11], цуговых систем за все время проведения работ не наблюдалось. С целью наглядного примера ниже в работе

приводятся результаты спектрального и вейвлет-анализа вертикальных смещений термоклина по данным одного из эпизодов сканирования, отражающий типичную по термохалинной структуре изменчивость в верхнем 50-метровом слое для исследуемого района Баренцева моря (рис. 2). В качестве положения середины термоклина выбрана изотерма $T(z) = 8\text{ °C}$ и показатель ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$.

Результаты расчетов и их обсуждение. Экспериментальные характеристики КВВ оценивались по результатам непрерывных наблюдений за изменчивостью положения термоклина (по экспериментальным данным наблюдалось совпадение в положении термоклина и пикноклина, что позволяет оценивать

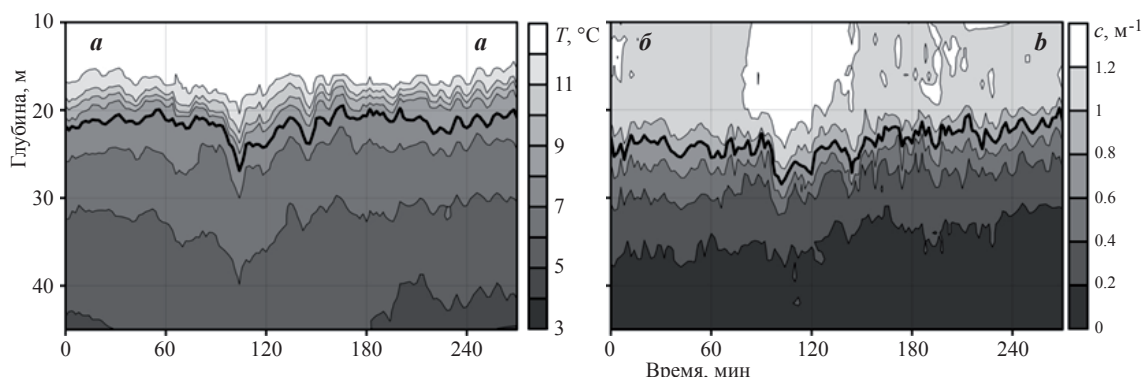


Рис. 2. Временная изменчивость температуры (а) и показателя ослабления света (б) по данным сканирования в Баренцевом море 19 августа 2016 г.

Выделенная линия — среднее положение термоклина по данным глубин залегания изотермы $T(z) = 8\text{ °C}$ (а) и показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$ (б).

Fig. 2. Temporal variability of temperature (a) and light attenuation index (b) according to scanning data in the Barents Sea on August 19, 2016. The leased line is the average position of the thermocline according to the depth of the isotherm $T(z) = 8\text{ °C}$ (a) and attenuation of light $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$ (b).

колебания термоклина как колебания слоя скачка, и поэтому в дальнейшем при анализе характеристик ВВ использовались данные по температуре). Каждая ВВ выделяется по изменению положения характерной изотермы во времени.

За все время наблюдений было зарегистрировано 170 колебаний изотерм. Представление о статистических характеристиках высот и периодов ВВ можно получить из рис. 3. В районе преобладает внутреннее волнение высотой 1—2 м и периодом 10—20 мин, которое составляет примерно 45 % от общего числа наблюдений. Наиболее повторяющаяся высота ВВ составила 1.4 м, а период — 14.5 мин. Максимальная из зарегистрированных волн имела высоту 5.7 м и период 45 мин. Из рисунка видно, что около 45 % зарегистрированных КВВ имеют высоту 2—6 м, а 40 % волн — периоды свыше 20 мин. Стоит оговориться, что наличие промежутков между столбцами гистограмм не означает, что высота и период ВВ не могут принимать значения, приходящиеся на эти промежутки.

Особенность гидрологии исследуемого района Баренцева моря в виде стратификации с большим перепадом температуры накладывает отпечаток на характеристики ВВ, приводя к увеличению их фазовых скоростей по сравнению с волнами, распространяющимися в среде с меньшим скачком температуры. Наличие выраженной стратификации (рис. 1) позволяет предположить принадлежность измеренных ВВ к первой моде, однако все же более убедительным аргументом в пользу данного утверждения является синфазность колебаний изотерм на различных глубинах (рис. 2, а).

При анализе положения термоклина определялись характеристики каждой ВВ отдельно. Параметры ВВ (длина волны и фазовая скорость), полученные на основе проведенных расчетов для приближения первой моды по методике, изложенной в [12], приведены на рис. 4. На рисунке представлены зависимости периода (T) и фазовой скорости волны (c_0) от длины волны (λ) по данным 6-ти эпизодов сканирования. Точками на рис. 4, а отмечены экспериментальные оценки периодов ВВ. Из рисунка видно, что длины волн лежат в диапазоне от 100 до 1400 м, а фазовые скорости — 25—45 см/с (рис. 4, б). Например, ВВ с периодом свыше 20 мин имеют длину от 500 м и более, а фазовую скорость — 40—45 см/с. Зависимость периода от длины волны носит фактически линейный характер. Величина достоверности аппроксимации (коэффициента детерминации) $R^2 = 0.98$ целиком указывает на то, что уравнение линейного тренда, приведенное на рисунках, практически полностью соответствует экспериментальным оценкам характеристик ВВ.

Зависимость фазовой скорости от длины волны аппроксимировано логарифмической зависимостью с $R^2 = 0.81$ (рис. 4, б). Точки имеют более заметный разброс относительно аппроксимационной функции, чем на зависимости периода ВВ от длины. Это обстоятельство объяснимо, так как в нашем случае при расчете значений фазовых скоростей не учитывается фоновое течение, неизбежно присутствующее в море, и дрейфовое смещение, дающие доплеровскую поправку на дисперсионные характеристики наблюдаемых ВВ.

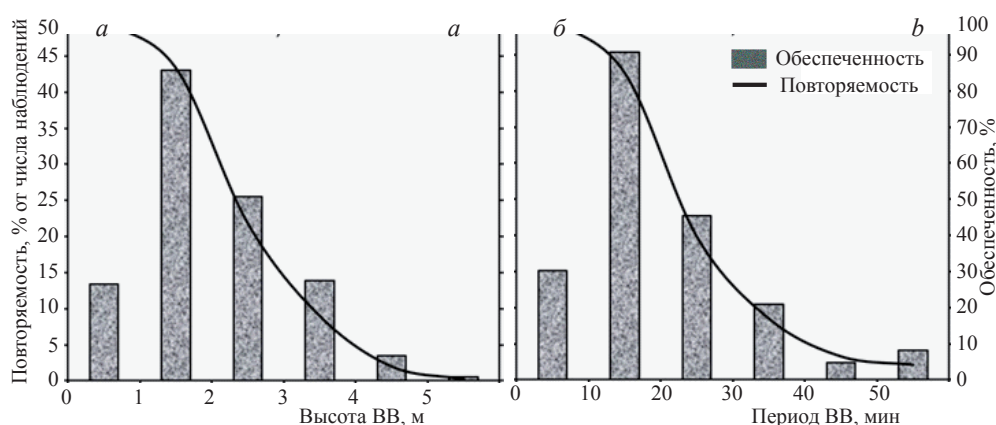


Рис. 3. Гистограммы повторяемости и обеспеченности высот (а) и периодов ВВ (б) в Баренцевом море по данным 6-ти эпизодов сканирования.

Fig. 3. Histograms of repeatability and security of heights (a) and periods of ВВ (b) in the Barents Sea according to 6 episodes of scans.

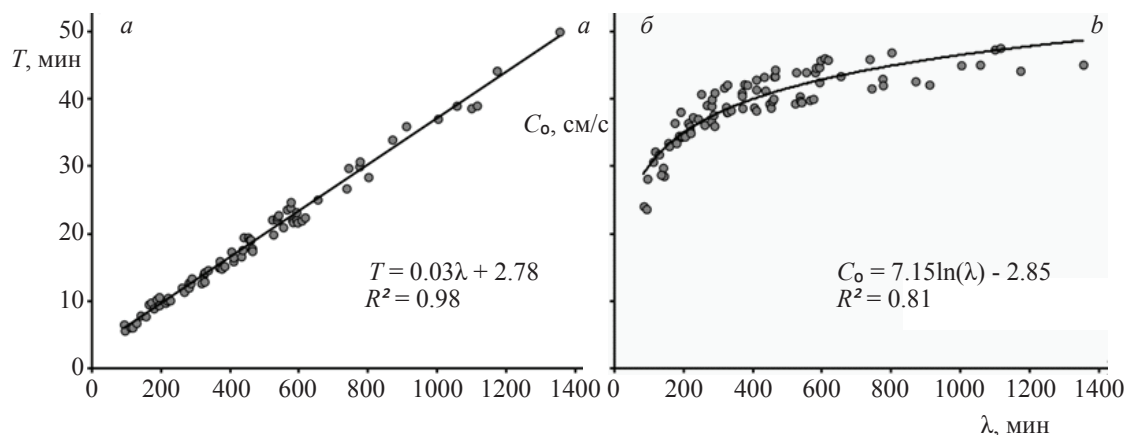


Рис. 4. Зависимость оценок периода ВВ (а) и фазовой скорости (б) от длины волны (λ).

Линии — аппроксимирующие зависимости, точки — экспериментальные.

Fig. 4. Dependence of estimates of the explosive period (a) and phase velocity (b) on the wavelength (λ). Lines show approximating dependences, and dots show experimental ones.

Анализ вариаций характеристик связи температуры и показателя ослабления света производился с использованием скользящего осреднения фильтром Савицкого-Голея [17] с окном 90 мин с целью исключения влияния низкочастотных волновых колебаний на спектральные характеристики в диапазоне проявления КВВ (от 1 ч и менее). Суть метода Савицкого-Голея заключается в том, что по анализируемому ряду, как и в методе скользящего среднего, «пробегает» временное окно, внутри которого эмпирическая зависимость аппроксимируется с помощью полинома заданного невысокого порядка, начиная с квадратичной функции (параболы). При повышении степени полинома лучше воспроизводятся узкие и высокие пики. Результат аппроксимации — гладкая дифференцируемая функция, из которой путём дискретизации выбираются значения, соответствующие моментам времени, в которые фиксировались отсчёты исходного сигнала. Этот способ фильтрации хорошо подходит для зашумленных сигналов, в которых при сглаживании требуется сохранить высокие частоты. Фильтр Савицкого-Голея для дискретных сигналов с фиксированным шагом представляет хорошие сглаживающие способности, не внося значительных изменений в информационную составляющую по сравнению с другими фильтрами. В алгоритме Савицкого-Голея использовалась линия регрессии второго порядка в скользящем окне из 90 точек. Результаты работы фильтра представлены на рис. 5, а (см. вклейку).

На рис. 5 (а, б) показаны амплитуды вейвлет-коэффициентов (W) рядов вертикальных смещений термоклина по данным температуры и показателя ослабления света, прошедших обработку скользящим фильтром. Коэффициенты представлены в виде цепочек «холмов», имеющих «вершины» на масштабе, соответствующем периоду колебаний и расположенные 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 соответствует периоду колебаний. Значение амплитуды вейвлет-преобразования в конкретной точке тем выше (по абсолютной величине), чем сильнее корреляция между вейвлетом данного масштаба и поведением сигнала в окрестности точки. На картах амплитуд вейвлет-коэффициентов выделяются периодически повторяющиеся детали, в комплексе представляющие собой квазипериодические структуры, состоящие из 3—4 волн в диапазоне масштабов 30—50 мин и 10—20 мин, а временной протяженностью — до 2.5 ч (рис. 5, б). Согласно результатам исследований, проявление локальных периодичностей в указанных диапазонах имеет место в течение всего периода наблюдения за ВВ.

Интегральный спектр мощности вертикальных смещений термоклина, рассчитанный по данным глубин залегания изотермы $T(z) = 8^\circ\text{C}$ и показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$ приведен на рис. 6. Наибольшая статистически значимая мощность, представленная в единицах дисперсии σ^2 исходных рядов сосредоточена в диапазоне 30—50 мин. Здесь в рядах показателя ослабления света отчетливо проявляется волновая составляющая. Если пик в спектре превышает 95 %-ную доверительную границу, то он является статистически значимым с вероятностью 95 %. Максимумы достигаются на периодах 20 мин в спектре температуры и 40 мин на обоих спектрах. Дисперсия участка температурного сигнала, соответствующая пику на периоде 40 мин превышает дисперсию исходного сигнала в 23 раза.

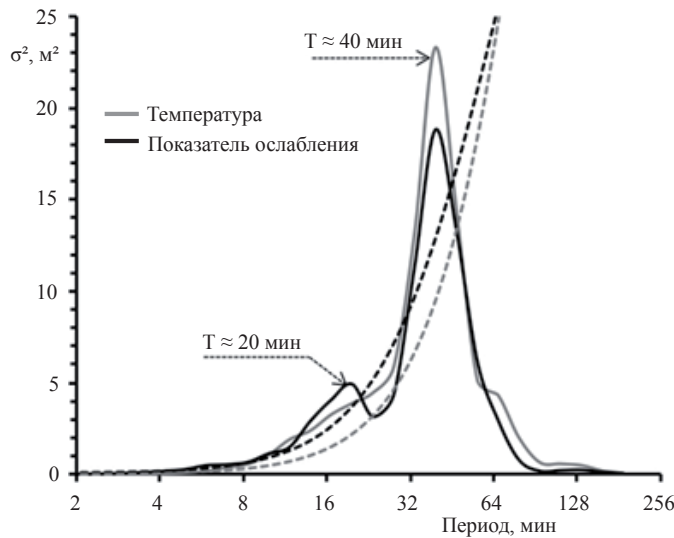


Рис. 6. Интегральные вейвлет-спектры мощности колебаний термоклина по данным вертикальных смещений изотермы $T(z) = 8^\circ\text{C}$ и показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$ в единицах дисперсии σ^2 . Пунктиром отмечены 95 %-ные уровни значимости по отношению к красному шуму.

Fig. 6. Integral wavelet spectra of the thermocline oscillations according to the vertical displacements of the isotherm $T(z) = 8^\circ\text{C}$ and the light attenuation index $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$ in units of dispersion σ^2 .

The dotted line marks the 95 % levels of significance with respect to red noise.

Для ориентировочной оценки степени линейной взаимосвязи колебаний термоклина по данным показателя ослабления света и температуры моря был применен взаимный корреляционный анализ (рис. 7). Оценка вза-

имной корреляционной функции $Rc(T)$, служащей мерой устойчивости ортогонального состояния при сдвигах сигналов во времени, для рассматриваемых рядов имеет максимальное абсолютное значение 0.8 при нулевом запаздывании, т. е. рассматриваемые процессы протекают синхронно. Как видно из рисунка, график представляет собой затухающую косинусоиду. Это указывает на то, что в исходном процессе присутствует квазипериодическая (циклическая) составляющая, период которой близок к 40 мин. Он же присутствует на интегральных спектрах мощности (рис. 6).

Однако взаимнокорреляционный (в том числе корреляционный, используемый для установления связи между показателем ослабления света и гидрологическими параметрами в ранее упомянутых источниках) анализ, как и Фурье-анализ, приемлем для стационарных временных рядов, статистические свойства которых достаточно стабильны на любых их отрезках. Эта особенность делает метод подходящим инструментом для исследования процессов, параметры которых — амплитуды и частоты — не меняются со временем. Следует отметить малую эффективность метода, когда в выборке присутствуют аномальные значения, нерегулярности или локальные выбросы (очевидно большие или очевидно низкие). Например, (рис. 7 и рис. 5, б) взаимнокорреляционная функция не содержит информации о периодах, меньших 40 мин, и их связи с временным расположением. Вследствие неоднородности исследуемых временных рядов возникают ошибки при интерпретации и подсчете коэффициента взаимной корреляции. Одной такой ошибки иногда оказывается достаточно для того, чтобы коэффициент взаимной корреляции существенно увеличился.

Таким образом, нерегулярные взаимодействия между процессами не могут быть с достаточной уверенностью изучены с помощью взаимнокорреляционного анализа, и для более подробного понимания изменчивости в частотном пространстве и времени исследуемых процессов используется взаимный вейвлет-анализ с целью уточнения причинно-следственных связей и выявления пространственно-временной синхронизации между рядами. Взаимный вейвлет-анализ представляет собой свертку комплекснозначных и взаимно-сопряженных вейвлет-спектров каждого из рядов. Он показывает наибольшие значения на тех временах и масштабах, где оба ряда ведут себя подобным друг другу образом. Поэтому заключительным этапом исследования является вычисление кросс-вейвлет и вейвлет-когерентного спектра обоих исследуемых рядов с целью оценки степени сопряженной временной изменчивости.

Кросс-вейвлет спектр позволяет выявить спектральные области, для которых значительна совместная мощность сигнала. Кросс-спектральный анализ сводится к вычислению произведения двух спектральных функций (амплитуд коэффициентов вейвлет-преобразования рядов вертикальных смещений показателя ослабления света (X) и температуры (Y)), нормированных на произведение стандартных отклонений ($\sigma_X \sigma_Y$) временных рядов

$$W_{XY} = \frac{W_X W_Y^*}{\sigma_X \sigma_Y},$$

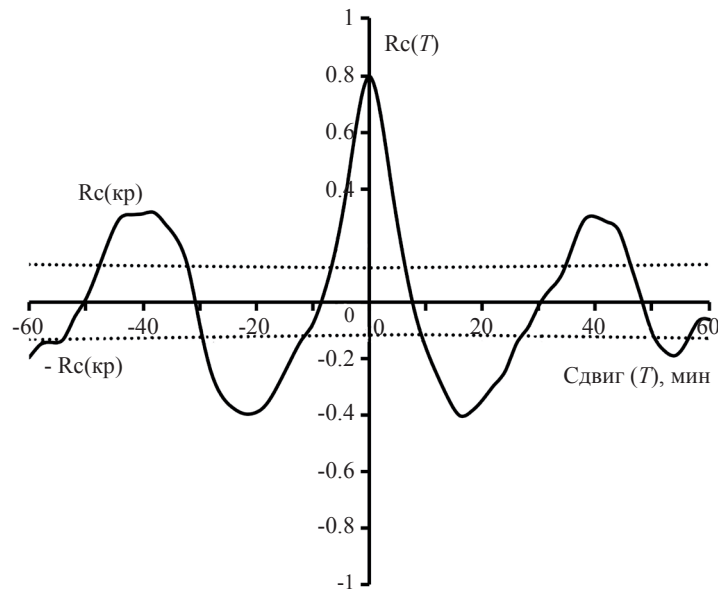


Рис. 7. Взаимнокорреляционная функция колебаний термоклина по данным вертикальных смещений изотермы $T(z) = 8^\circ\text{C}$ и показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$.

Fig. 7. The mutual correlation function of the thermocline oscillations from the data of the vertical displacements of the isotherm $T(z) = 8^\circ\text{C}$ and the light attenuation index $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$.

где звездочкой обозначено комплексное сопряжение. Далее определяется кросс-вейвлет мощность $|W_{xy}|$.

Показателем тесноты связи между гармоническими составляющими на различных временных масштабах для текущего момента времени является функция когерентности, которая определяется как квадрат кросс-вейвлет мощности, нормализованной на произведение индивидуальных вейвлет-спектров мощности обоих временных рядов:

$$R_{xy}^2 = \frac{|S(s^{-1}W_{xy})|^2}{S(s^{-1}|W_x|^2) \cdot S(s^{-1}|W_y|^2)},$$

где s — временной масштаб (период колебаний), а S — сглаживающий оператор [16]. Когерентность интерпретируется как квадрат коэффициента корреляции, и ее значения варьируются в интервале от 0 до 1.

Кросс-вейвлет спектр (рис. 8, а) показал, что области, для которых совместная мощность сигнала превышает уровень значимости $p = 0.95$ (для модели, учитывающей автокоррелированность рядов или «красный шум») ограничиваются диапазонами 10—20 мин и 25—50 мин между 60 и 180-й минутой. Колебания в зоне максимальных значений кросс-спектральных характеристик относительно красного шума в диапазоне 25—50 мин находятся в фазе, а в диапазоне 10—20 мин — с задержкой по времени друг относительно друга до 3 мин. Временная задержка между процессами рассчитывается по формуле

$$\Delta\tau = \alpha^\circ \frac{0.25}{90^\circ} s,$$

где α° — относительная фаза колебаний (наклон стрелки).

Расчеты кросс-вейвлет спектров вертикальных смещений термоклина для серий из 6-ти сканирований показала статистически значимое систематическое увеличение взаимной спектральной мощности в диапазоне 25—50 мин, которое соответствовало моменту перехода от большой воды к малой, т. е. отливу. Появление в диапазоне 10—20 мин областей локального усиления взаимной энергии не связано с фазой приливного цикла.

Вейвлет-когерентный спектр (рис. 8, б) свидетельствует о наличии взаимосвязи исследуемых процессов (преимущественно в фазе с нулевым запаздыванием). При этом наряду с интервалами с высокой когерентностью отмечаются интервалы ослабления и даже отсутствия значимой взаимосвязи между

колебаниями температуры и показателем ослабления света. Частотно-временная зона, лежащая вне области с вейвлет-когерентностью, отличной от нуля на уровне значимости 0.05 не является надежным показателем причинно-следственной связи. Высокая степень синхронизации колебаний с когерентностью свыше 0.9 отмечается в диапазоне временных масштабов 20—60 мин. Т. е. волновой процесс здесь синхронно отражается на изменчивости во времени показателя ослабления. Протяженность зоны повышенной когерентности наблюдается на всем частотно-временном интервале. Однако для более длиннопериодных вариаций влияние краевых эффектов ограничивает надежность результатов анализа. В области масштабов менее 20 мин присутствуют временные когерентные структуры.

Выявленные частотно-временные особенности вейвлет-когерентного спектра частично сохраняются на кросс-вейвлет спектре, где низкокогерентные участки с взаимно-значимым усилением мощности сигнала в диапазоне 10—20 мин, как и присутствие локальных высококогерентных областей здесь же, могут быть следствием влияния адвективных процессов на формирование возмущений и относительную фазовую рассогласованность исследуемых процессов. Кроме того, не исключается и случайный характер появления подобных структур на малых временных масштабах.

На основании результатов проведенных исследований выделены основные черты поля КВВ в глубоководном районе Баренцева моря в 50 км к северо-востоку от о. Харлов.

1. В районе преобладает внутреннее волнение высотой 1—2 м и периодом 10—20 мин, которое составляет примерно 45 % от общего числа наблюдений. Около 45 % зарегистрированных КВВ имеют высоту 2—6 м, а 40 % волн — периоды свыше 20 мин.

2. Длины волн лежат в диапазоне 100—1400 м, а фазовые скорости — 25—45 см/с. ВВ с периодом свыше 20 мин имеют длину от 500 м и более, а фазовую скорость — 40—45 см/с.

3. Хорошо выраженных, соответствующих критериям интенсивных ВВ, цуговых систем за все время проведения работ не наблюдалось.

Выделены статистически обеспеченные энергонесущие максимумы на интегральном спектре, которые приходятся на периоды 40 и 20 мин.

Взаимный спектральный вейвлет-анализ между глубиной залегания изотермы, описывающей структуру поля ВВ и являющейся индикатором внутреннего волнения в слое скачка, и показателем ослабления света указал на синхронную, растянутую по всему частотно-временному диапазону записи,

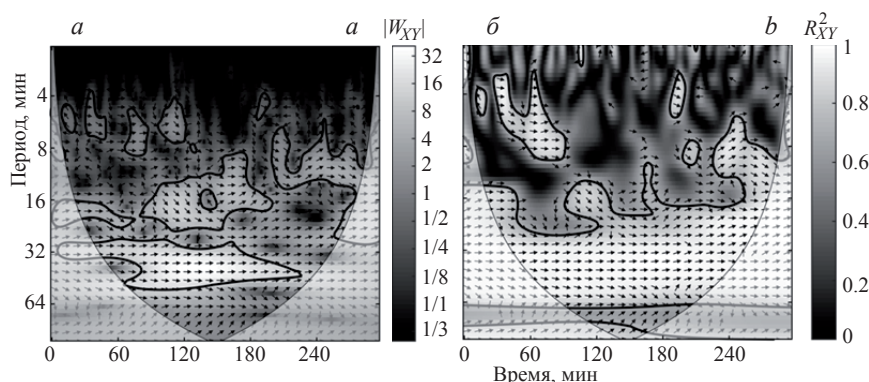


Рис. 8. Кросс-вейвлет спектр мощности (а) и вейвлет-когерентность (б) колебаний термоклина по данным глубин залегания показателя ослабления света $c(z) = 0.85 \text{ м}^{-1}$ (X) с вертикальным смещением изотермы $T(z) = 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Y).

Сплошные линии отделяют области краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области с взаимным кросс-вейвлет спектром и вейвлет-когерентностью, отличными от нуля на уровне значимости $p = 0.95$ по отношению к красному шуму. 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° .

Fig. 8. Cross-wavelet power spectrum (a) and wavelet coherence (b) of the thermocline oscillations according to the depth of the light attenuation index $c(z) = 0.85 \text{ м}^{-1}$ (X) with the vertical isotherm shift $T(z) = 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Y).

Solid lines separate regions of edge effects, and thick lines limit regions with mutual cross-wavelet spectrum and non-zero wavelet coherence at a significance level of $p=95\%$ with respect to red noise. The arrows in the figure show the relative phase of the oscillation: « \rightarrow » the oscillations are in phase; « \leftarrow » oscillations are in antiphase; « \downarrow » row X is ahead of row Y by 90° ; « \uparrow » row Y is ahead of row X by 90° .

связь в диапазоне 20—60 мин. Когерентность в этом интервале достигала 0.9 и даже более, что указывает на взаимосвязь между процессами с квазилинейным откликом колебательной системы.

Следует добавить, что единовременное усиление колебаний термоклина в диапазоне 25—50 мин с высоким коэффициентом когерентности проявляется в рядах температуры и показателя ослабления света в фазу отлива и приходится на сизигию в период максимального баротропного прилива, в частности с 18 по 20 августа. Не исключено, что в обострение температурных колебаний вносит вклад усиление внутреннего прилива, которое напрямую связано с возрастанием баротропного.

Таким образом, анализ исследуемых рядов температуры и показателя ослабления света указал на высокую, практически линейную взаимосвязь между вертикальными смещениями этих характеристик в слое скачка, что является достаточным обоснованием для уверенного и эффективного применения контактных и дистанционных оптических средств измерений для регистрации КВВ с периодами 20—60 мин в глубоководном районе Баренцева моря. Колебания термоклина с периодами менее 20 мин проявляются в виде нерегулярных когерентных структур с фазовой нестабильностью, и поэтому не могут служить надежным индикатором поля КВВ по результатам только лишь оптических наблюдений.

Литература

1. 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.
2. Жегулин Г. В., Зимин А. В. Применение непрерывного вейвлет-преобразования для выделения внутренних волн и турбулентности // *Труды IV научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб., 2015. С. 213—217.
3. 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.
4. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях / Под ред. И. В. Лавренова, Е. Г. Морозова. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 363 с.
5. Серебряный А. Н. Внутренние волны в прибрежной зоне Баренцева моря. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 363 с.
6. Талипова Т. Г., Куркина О. Е., Терлецкая Е. В., Куркин А. А., Рувинская Е. А. Моделирование внутренних волн в прибрежной зоне Баренцева моря // *Экологические системы и приборы*. 2014. № 3. С. 26—38.
7. Неуймин Г. Г., Сорокина Н. А. О корреляции между вертикальными распределениями оптических и гидрологических характеристик // *Океанология*. 1976. Т. 16, № 3. С. 441—450.
8. Матюшенко В. А., Лукин Л. Р., Хоменко Г. Д., Галеркин Л. И. Показатель ослабления света и его связи с гидрологическими характеристиками и содержанием взвешенного вещества в водах Баренцева моря. Опыт системных океанологических исследований в Арктике / Под ред. А. Л. Лисицына, М. Е. Виноградова, Е. А. Романкевича. М.: Научный мир, 2001. С. 432—442.
9. Родионов М. А., Долина И. С., Левин И. М. Корреляции между вертикальными распределениями показателя ослабления света и плотности // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т. 5, № 4. С. 39—46.
10. Родионов М. А. Моделирование лидарных изображений внутренних волн по результатам измерений гидрооптических и гидрофизических параметров в северных морях // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4, № 4. С. 80—87.
11. Сабинин К. Д., Серебряный А. Н. Горячие точки в поле внутренних волн в океане // *Акустический журнал*. 2007. Т. 53, № 3. С. 410—436.
12. Жегулин Г. В., Зимин А. В., Родионов А. А. Анализ дисперсионных зависимостей и вертикальной структуры внутренних волн в Белом море по экспериментальным данным // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 4. С. 47—59.
13. Короновский А. А., Храмов А. Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 176 с.
14. 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.
15. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. СПб.: Изд. РГТМУ, 2008. 408 с.
16. 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.* 2003. 108(D21), 4677, doi:10.1029/2003JD003417.
17. Savitzky A., Galay M. J. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // *Anal. Chem.* 1964. V. 36. P. 1627—1639.

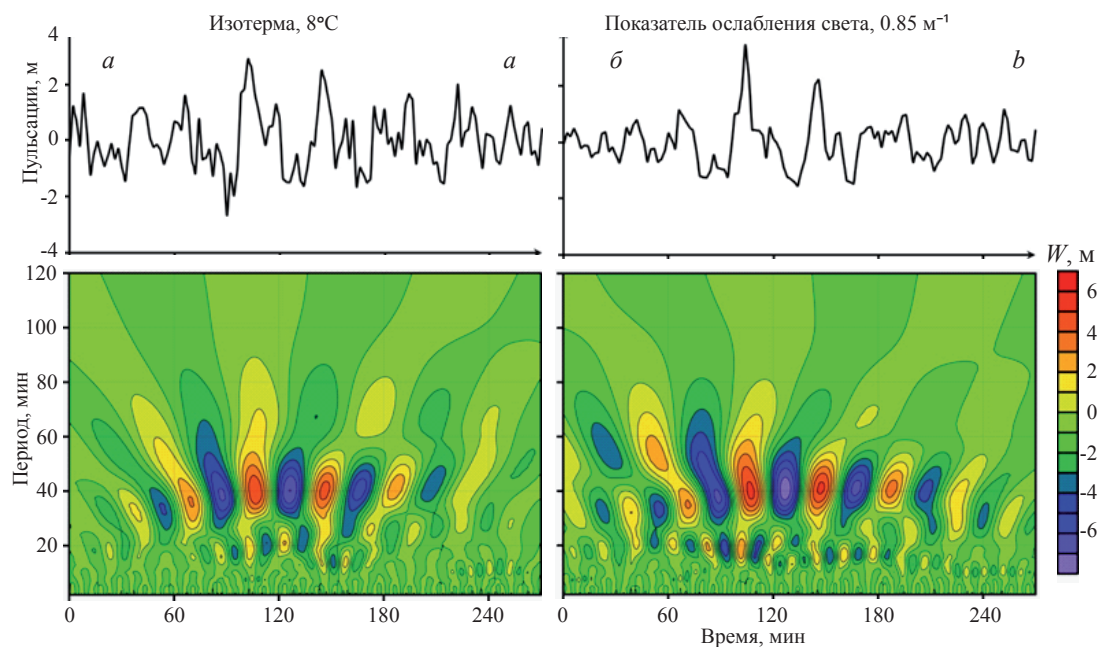


Рис. 5. Осредненные пульсации вертикальных смещений термоклина (а) и амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования (б) по данным глубин залегания изотермы $T(z) = 8^{\circ}\text{C}$ и показателя ослабления света $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$.

Fig. 5. Averaged fluctuations of the thermocline vertical displacements (a) and amplitudes of wavelet transform coefficients (b) according to the depth of the isotherm $T(z) = 8^{\circ}\text{C}$ (a) and the light attenuation index $c(z) = 0.85\text{ м}^{-1}$.