

Научная статья

УДК 551.465
EDN: APYTLD

Цуги короткопериодных внутренних волн на шельфе Черного моря по данным измерений кластера термокос

В. В. Очередник ✉, А. Г. Зацепин

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия
✉ v.ocherednik@ocean.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023; одобрена после рецензирования 16.05.2023;
принята к публикации 05.07.2023.

Аннотация

Цель. Цель работы – расчет и анализ характеристик цугов короткопериодных внутренних волн на основе данных долговременных измерений вертикальных распределений температуры кластером из трех разнесенных между собой заякоренных термокос на шельфе Черного моря в районе Голубой бухты, Южное отделение Института океанологии Российской академии наук (г. Геленджик).

Методы и результаты. Измерения проводились в 2018–2020 гг. Кластер из трех термокос на заякоренных буйковых станциях с притопленными буйами располагался на расстоянии около 1300 м от берега и был подключен к мультимодемной станции, посредством которой данные передавались по оптоволоконному кабелю в береговой центр сбора и хранения данных в онлайн-режиме. Буйковые станции с термокосами несколько раз устанавливались на глубинах 24–28 м в вершинах треугольника со сторонами, изменявшимися от постановки к постановке в диапазоне от 38 до 127 м. Термокосы длиной около 20 м, разработанные и изготовленные в Южном отделении Института океанологии РАН, производили частые (раз в 10 секунд) измерения температуры с помощью высокочувствительных датчиков, расположенных по вертикали со скважностью менее 1 м. Обработка данных позволила выявить более 50 случаев регистрации цугов внутренних волн с амплитудой колебаний от 1 до 10 м. Цуги наблюдались наиболее часто в весенний сезон года в период развития термоклина. Были рассчитаны значения периода внутриволновых колебаний, фазовой скорости распространения (величина и направление), длины и амплитуды внутренних волн и их количество в цуге.

Выводы. Оказалось, что внутренние волны распространяются преимущественно из глубоководной части моря к берегу и часто обнаруживаются во фронтальных зонах, связанных с вторжением более теплых или холодных вод на акваторию расположения термокос. Установлена статистически достоверная зависимость фазовой скорости внутренних волн от параметров температурной стратификации, а также их параметра нелинейности.

Ключевые слова: Черное море, шельф, кластер термокос, долговременные измерения, температурная стратификация, цуги внутренних волн, термокоса, внутренние волны

Благодарности: работа выполнена в рамках темы госзадания ИО РАН FMWE-2021-0013 и при поддержке проекта РНФ № 23-17-00056.

Для цитирования: Очередник В. В., Зацепин А. Г. Цуги короткопериодных внутренних волн на шельфе Черного моря по данным измерений кластера термокос // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 650–670. EDN APYTLD.

Packages of Short-Period Internal Waves on the Black Sea Shelf Based on the Measurement Data of the Thermoresistor Chains Cluster

V. V. Ocherednik ✉, A. G. Zatsepin

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

✉ v.ocherednik@ocean.ru

Abstract

Purpose. The study is purpose at calculating and analyzing the characteristics of short-period internal wave (IW) packages based on the long-term measurements of vertical temperature distributions by a cluster of three moored thermoresistor chains spaced apart from each other and placed on the Black Sea shelf in the Golubaya Bay area (the Southern Branch of IO RAS, Gelendzhik).

Methods and Results. Measurements were carried out in 2018–2020. A cluster of three thermoresistor chains at the moored buoy stations supplied with the submerged buoys was located at a distance of about 1300 m from the coast and connected to a multimodem station, through which the data was transmitted online to the onshore data server via a fiber optic cable. The moored buoy stations with the thermoresistor chains were installed several times at the depths 24–28 m in the corners of a triangle with the sides that varied from setting to setting in the range from 40 to 130 m. Frequent (every 10 s) temperature measurements were performed by highly sensitive sensors spaced vertically at a distance of about 1 m from each other. Data processing made it possible to identify more than 50 recorded cases of IW packages with the 1–10 m amplitude of oscillations, at that they were observed most often in spring (during the thermocline development). The values of the IW oscillation period, phase velocity of their propagation (magnitude and direction), length and amplitude, and also their number in a package were calculated.

Conclusions. It was revealed that the IW packages propagate mainly from the deep part of the sea to the coast. They are often observed in the frontal zones related to the intrusion of warmer or colder waters to the thermoresistor chains location area. The IW phase velocity was established to be in a statistically significant dependence on the temperature stratification parameters as well as on the IW non-linearity parameter.

Keywords: Black Sea, shelf, thermoresistor chain cluster, long-term measurements, temperature stratification, internal wave package, thermoresistor chain, internal waves

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of state assignment of IO RAS FMWE-2021-0013 and supported by the RSF grant No. 23-17-00056.

For citation: Ocherednik, V.V. and Zatsepin, A.G., 2023. Packages of Short-Period Internal Waves on the Black Sea Shelf Based on the Measurement Data of the Thermoresistor Chains Cluster. *Physical Oceanography*, 30(5), pp. 612-631.

Введение

Среди короткопериодных и субмезомасштабных гидрофизических процессов в природных стратифицированных водоемах внутренние волны (ВВ) занимают особое место. Во-первых, это наиболее хорошо организованный и регулярный процесс, имеющий ярко выраженный колебательный характер. Во-вторых, это один из самых быстрых механизмов переноса энергии и импульса в толще вод на большое расстояние. В-третьих – и в-главных – неустойчивость и обрушение ВВ являются одним из основных источников энергии мелкомасштабного турбулентного перемешивания вод океана [1].

Несмотря на то что ВВ являются объектом пристального исследования на протяжении многих десятилетий, их закономерности, механизмы образования и разрушения не вполне изучены [2, 3]. Это, в частности, относится к короткопериодным ВВ на шельфе Черного моря, хотя они изучались многими специалистами с использованием различных методов исследования [2–23]. Несмотря на то что Черное море является практически бесприливным, в нем существует развитое поле ВВ. При этом значения амплитуды ВВ примерно на порядок меньше, чем в океане или приливных морях. Тем не менее здесь также встречаются интенсивные ВВ [4, 5].

Цепочки температурных датчиков (термокосы) для исследования гидрофизических процессов, в том числе ВВ, применяются нередко. В многочисленных публикациях описаны варианты использования стационарно установленных термокос, размещенных на стационарных платформах [13, 24], дрейфующих буях [22, 25, 26] или на судах, перемещающихся на малой скорости [27, 28]. Стационарно установленные термокосы являются эффективным инструментом для исследования как сезонной и межгодовой изменчивости температуры, так и короткопериодной с масштабом от нескольких секунд до нескольких суток. В России заякоренные термокосы успешно использовались при исследовании короткопериодных гидрофизических процессов в Черном и Балтийском морях [20, 21, 29].

В данной работе, в отличие от многих других исследований, измерение характеристик короткопериодных ВВ проводилось с помощью не единичной заякоренной термокосы, а кластера заякоренных термокос (далее – «кластер»), долговременно установленных на шельфе северо-восточной части Черного моря в районе Голубой бухты [30].

Перед тем как приступить к описанию эксперимента, полученных данных, а также к изложению результатов измерений и их анализа, отметим, что весьма близкий по методу проведения и уникальный для того времени эксперимент с высокочастотными измерениями термокосами вертикальных распределений температуры проводился в Черном море в районе Голубой бухты еще в 1966–1967 гг. Ю. А. Ивановым и Б. Н. Филюшкиным с участием ряда сотрудников ИО АН СССР. В этом эксперименте чуть дальше от берега (на расстоянии 1500 м), чем в данной работе, был установлен кластер из трех термокос с расстоянием около 100 м между ними. Термокосы были подсоединены к подводному кабелю, выводившемуся на берег, где поступающая с них информация записывалась на самописец. Каждая термокоса состояла из шести полупроводниковых датчиков, расположенных на расстоянии 5 м друг от друга. Дискретность измерений составляла 2 мин, точность – 0,1 °С. Постановка кластера термокос продолжалась на протяжении 35 сут в летнее время. Четвертая термокоса располагалась на вехе Фруда, и информация с нее поступала по кабелю на борт судна, дрейфовавшего в глубоководной части моря в различные промежутки времени в период работы кластера термокос. Результаты обработки и анализа данных измерений с помощью термокосы на дрейфующей вехе Фруда описаны в работах [14, 19], а с помощью кластера заякоренных термокос – в [6]. Анализ результатов статистической обработки данных измерений дал основания сделать следующие выводы: колебания температуры в рассмотренном диапазоне частот, характерных для ВВ, обладают хорошо выраженной

переменяемость во времени, т. е. интервалы времени с большой амплитудой колебаний сменяются интервалами времени с малой амплитудой; энергия колебаний температуры существенно зависит от стратификации и достигает максимума для всех рассмотренных частот в слое максимального вертикального градиента температуры; на некоторых интервалах времени наблюдается достаточно высокая когерентность колебаний температуры, измеренной различными датчиками, как по вертикали, так и по горизонтали. По фазовым соотношениям для рядов с большой когерентностью были рассчитаны параметры ВВ, в частности их длина и фазовая скорость.

Целью работы является расчет и анализ характеристик цугов короткопериодных внутренних волн на основе данных долговременных измерений вертикальных распределений температуры кластером из трех разнесенных между собой заякоренных термокос на шельфе Черного моря в районе Голубой бухты.

В описываемых в данной статье результатах исследования, благодаря высоким значениям частоты измерения температуры, высокой точности и вертикальному разрешению, удалось надежно выделить несколько десятков случаев распространения цугов короткопериодных ВВ (от трех колебаний в цуге и более) и оценить не статистически, а индивидуально для тех волн, которые наблюдались на всех трех заякоренных термокосах в кластере, такие их параметры, как амплитуда, период, длина и фазовая скорость. Кроме того, установлена статистически достоверная зависимость фазовой скорости ВВ от параметров температурной стратификации, а также параметра нелинейности ВВ. Показано, что наиболее часто регулярные цуги ВВ наблюдаются вблизи фронтов, образованных языками более теплых или холодных вод, вторгающихся в район постановки кластера термокос.

Краткое описание термокос и особенностей их расположения в кластере

Схема расположения термокос в кластере на географической карте представлена на рис. 1, а.

Кластер размещался на акватории Полигона «Геленджик» [1] на дне, на глубине около 26 м, с 2018 по 2020 г. Термокосы устанавливались в вершинах треугольника со сторонами, не равными друг другу и изменявшимися от постановки к постановке, длиной от 40 до 130 м. Термокосы были подсоединены к мультимодемной станции [31], а станция, в свою очередь, – к бронированному оптоволоконному кабелю с двумя токопроводящими жилами, по которому осуществлялось электрическое питание приборов и оперативная передача данных измерений на береговой сервер.

Каждая термокоса длиной 20 м состоит из 21 термодатчика и 3 датчиков давления (на верхнем, среднем и нижнем горизонтах), сопряженных в едином корпусе с термодатчиками, расположенными на тех же горизонтах. Датчики размещены на одинаковом расстоянии друг от друга, составляющем приблизительно 1 м. Термокосы закреплены на заякоренных буйковых станциях с подповерхностным бумом, притопленным на глубину 5–6 м. Точность измерений температуры составляет около 0,01 °С, период измерения – 10 с. Детальное описание термокос представлено в работе [32]. С более подробным описанием кластера можно ознакомиться в [33].

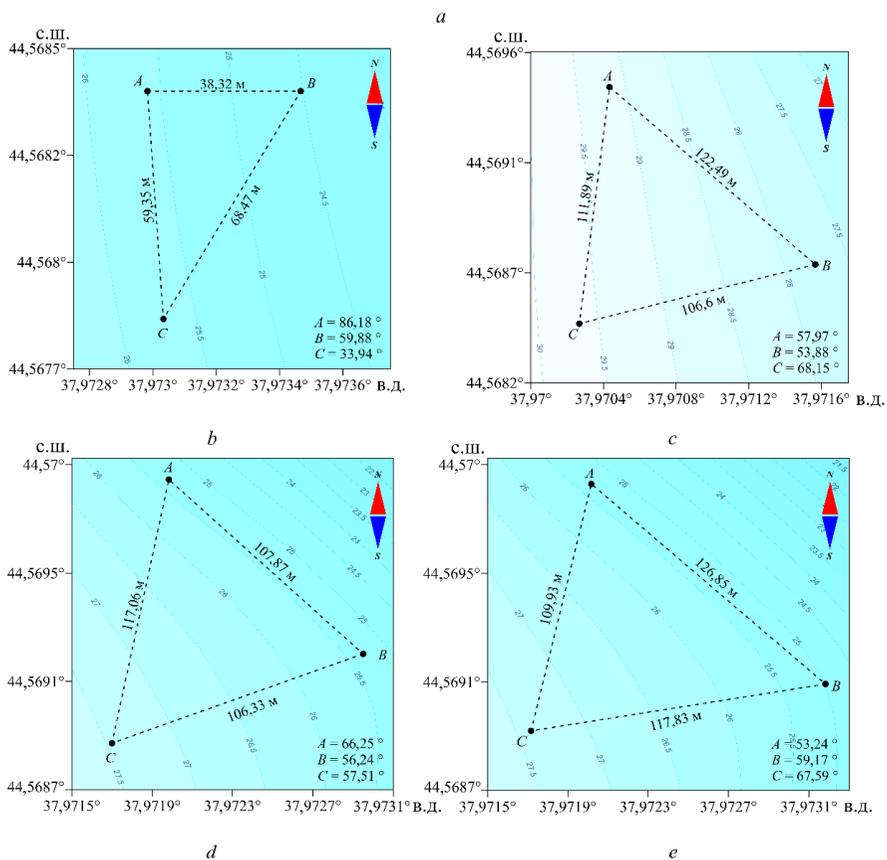
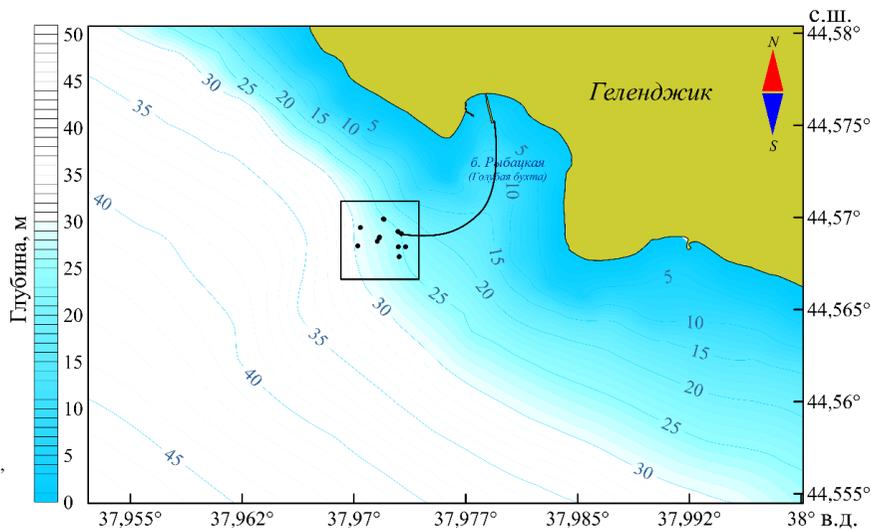


Рис. 1. Расположение (а) кластера термокос (точки) и их конфигурация в кластере с 24.04.2018 по 10.07.2018 (b), с 28.09.2018 по 17.02.2019 (c), с 24.04.2019 по 15.05.2019 (d), с 17.05.2019 по 02.06.2020 (e)

Fig. 1. Location (a) of the cluster of thermoresistor chains (points) and their configuration in the cluster from 24.04.2018 to 10.07.2018 (b), from 28.09.2018 to 17.02.2019(c), from 24.04.2019 to 15.05.2019 (d) and from 17.05.2019 to 02.06.2020 (e)

Термокосы устанавливались с моторной лодки. При этом первым делом термокоса коммутировалась с отводным кабелем, конец которого был предварительно маркирован поверхностным буйком. После этого термокоса включалась с берегового модуля. После проверки связи и инициализации работы датчиков устанавливалась заякоренная буйковая станция, на которой располагалась термокоса. При этом подповерхностный буй с термокосой постепенно вытравливался за борт на всю длину. Буй отходил от лодки по течению, а лодка под мотором медленно перемещалась в намеченную точку постановки станции. По прибытии лодки в эту точку якорь буйковой станции сбрасывался за борт. Погружаясь на дно, якорь утягивал за собой термокосу и буй. По достижении якорем дна буйреп натягивался и термокоса приобретала положение, близкое к вертикальному. Буй при этом располагался на глубине 5–6 м от поверхности моря. После этого уточнялись координаты места постановки станции. Такая же операция производилась при постановке двух других термокос.

Как видно на рис. 1, конфигурация первого кластера далека от правильного треугольника и сильно отличается от его конфигурации в последующих постановках. Это связано с тем, что приемо-передающие кабели от мультимодемной станции к термокосам *A* и *B* имели недостаточно большую длину, а у термокосы *C* кабель уже был удлинен, что позволило отвести его и подсоединенную к нему термокосу на большее расстояние от мультимодемной станции. Следует также отметить, что ветровой дрейф лодки мешает установить станцию в избранной точке, поэтому реальная конфигурация термокос в кластере всегда несколько отличается от намеченной.

Данные измерений и их использование для расчета параметров внутренних волн

В работе анализировались данные термокос, полученные с апреля 2018 по июнь 2020 г. (рис. 2). Цуги ВВ были зафиксированы в основном в весенние месяцы во время формирования сезонного термоклина. Осенью зафиксировать ВВ не удалось по причине заглупления слоя скачка температуры на глубину более 20 м. При этом значительные перепады температуры наблюдались только в придонном слое, отображаясь на 1–2 термодатчиках, расположенных непосредственно над дном.

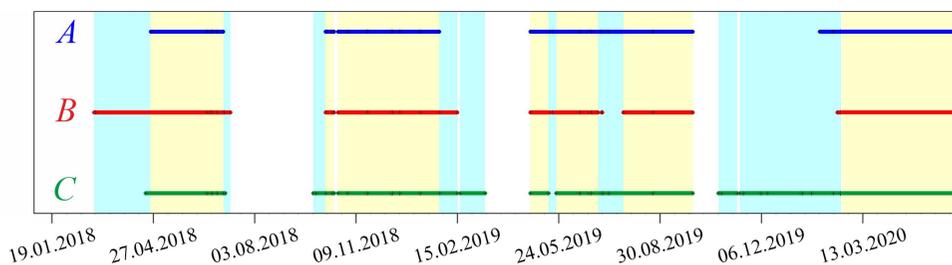
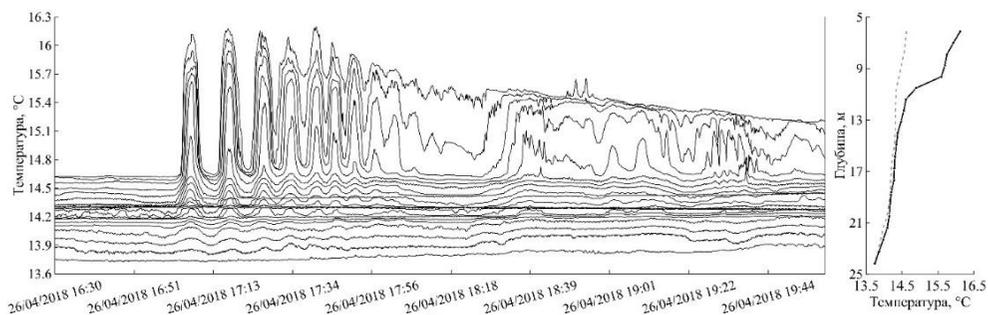


Рис. 2. Периоды измерения термокосами в составе кластера: тремя термокосами (желтый цвет), одной или двумя термокосами (голубой цвет). *A*, *B* и *C* – термокосы (см. рис. 1, *a*)

Fig. 2. Periods of measurement by thermoresistor chains in the cluster: three thermoresistor chains (yellow color), one or two thermoresistor chains (blue color). *A*, *B* and *C* are the thermoresistor chains (see Fig. 1, *a*)

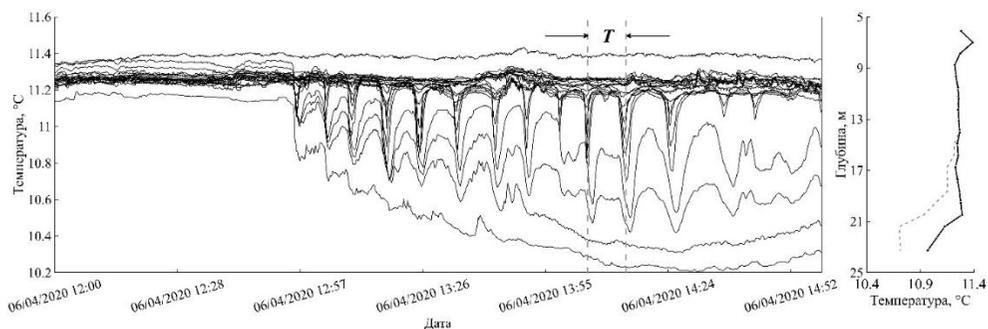
Примеры зарегистрированных ВВ, а также соответствующие им профили температуры в начале и в конце цикла измерений приведены на рис. 3–6. Зарегистрированные цуги ВВ были разделены по типам их проявления:

- в верхнем слое (рис. 3);
- в нижнем слое (рис. 4);
- в толще термоклина (рис. 5);
- во всей водной толще (рис. 6).



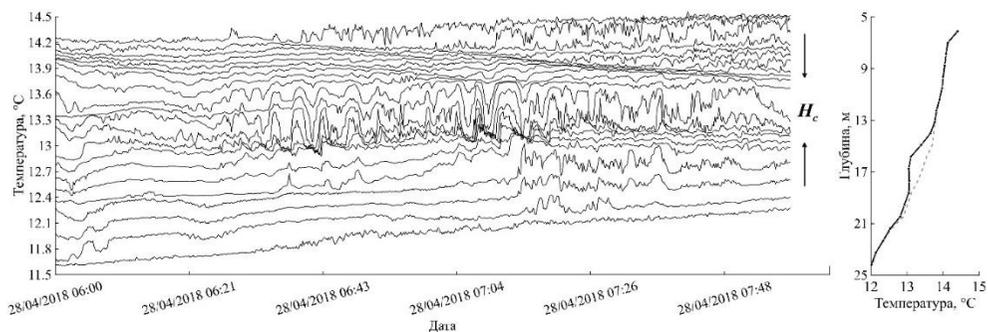
Р и с. 3. Пример цуга высокоамплитудных ВВ в верхнем слое: *слева* – временная развертка показаний температурных датчиков на одной из термокоз 26 апреля 2018 г. с 16:30 до 20:00; *справа* – вертикальные распределения температуры в начале (штриховая линия) и в конце (сплошная линия) представленного периода измерения

F i g. 3. An example of the high-amplitude IW package in the upper layer: *on the left* – time unrolling of temperature sensor readings at one of the thermoresistor chains on April 26, 2018 from 16:30 to 20:00; *on the right* – vertical temperature distributions at the beginning (dashed line) and at the end (solid line) of the presented measurement period



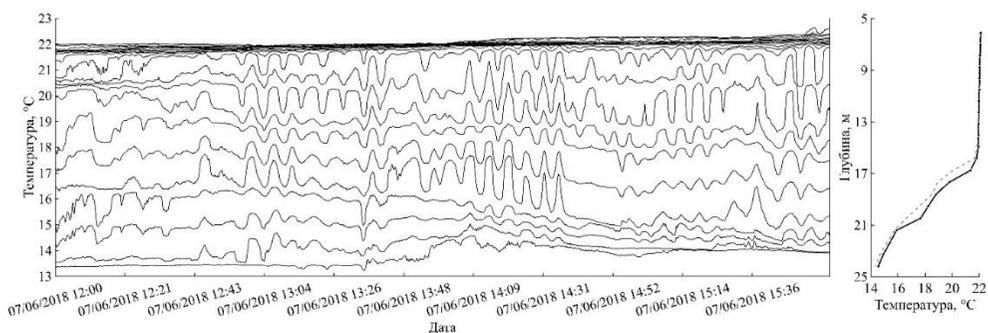
Р и с. 4. Пример цуга высокоамплитудных ВВ в нижнем слое: *слева* – временная развертка показаний температурных датчиков на одной из термокоз 6 апреля 2020 г. с 12:00 до 15:00 (буквой *T* обозначен период ВВ – время между двумя минимумами температуры на одном и том же датчике); *справа* – вертикальные распределения температуры в начале (штриховая линия) и в конце (сплошная линия) представленного периода измерения

F i g. 4. An example of the high-amplitude IW package in the lower layer: *on the left* – time unrolling of temperature sensor readings at one of the thermoresistor chains on April 6, 2020 from 12:00 to 15:00 (letter *T* denotes the IW period – the time between two temperature minimums at one and the same sensor); *on the right* – vertical temperature distributions at the beginning (dashed line) and at the end (solid line) of the presented measurement period



Р и с. 5. Пример цуга низкоамплитудных ВВ, в основном сосредоточенных внутри промежуточного слоя толщиной H_c в термоклине: *слева* – временная развертка показаний температурных датчиков на одной из термокос 28 апреля 2018 г. с 06:00 до 08:00; *справа* – вертикальные распределения температуры в начале (штриховая линия) и в конце (сплошная линия) представленного периода измерения

F i g. 5. An example of the low-amplitude IW package concentrated mainly within the intermediate layer of H_c thickness in the thermocline: *on the left* – time unrolling of temperature sensor readings at one of the thermoresistor chains on April 28, 2018 from 06:00 to 08:00; *on the right* – vertical temperature distributions at the beginning (dashed line) and at the end (solid line) of the presented measurement period



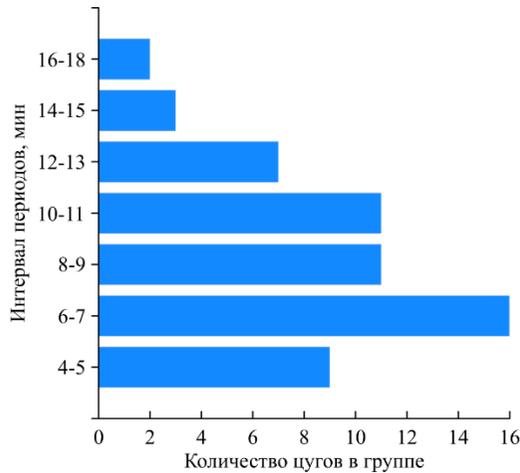
Р и с. 6. Пример цугов низкоамплитудных ВВ, охватывающих практически весь термоклин: *слева* – временная развертка показаний температурных датчиков на одной из термокос 7 июня 2018 г. с 12:00 до 16:00; *справа* – вертикальные распределения температуры в начале (штриховая линия) и в конце (сплошная линия) представленного периода измерения

F i g. 6. An example of the low-amplitude IW packages covering almost the entire thermocline: *on the left* – time unrolling of temperature sensor readings at one of the thermoresistor chains on June 7, 2018 from 12:00 to 16:00; *on the right* – vertical temperature distributions at the beginning (dashed line) and at the end (solid line) of the presented measurement period

Расчет параметров внутренних волн в цугах

При обработке данных измерений ВВ рассчитывались значения их периода T_{iw} , амплитуды a и фазовой скорости распространения c .

Период ВВ рассчитывался как интервал времени между соседними максимумами или минимумами температуры на одном и том же датчике. На рис. 7 приведена гистограмма рассчитанных периодов, распределенных по группам с шагом 2 мин.



Р и с. 7. Связь между периодами ВВ и количеством цугов
Fig. 7. Relationship between the IW periods and the number of packages

Периоды ВВ разделены на группы по 2 мин. Такое разделение необходимо для того, чтобы выяснить, периоды какой продолжительности регистрируются наиболее часто. При этом минимальный период составляет 4,25 мин (255 с), а максимальный – 17,15 мин (1029 с). Из рис. 7 видно, что большинство зарегистрированных цугов имеют период от 5 до 12 мин и в редких случаях около 15 и более мин.

Амплитуда ВВ, а вернее, их размах рассчитывался исходя из проявления температурных колебаний на датчиках при расстоянии между соседними датчиками 0,95–1,05 м. При этом учитывалось сокращение вертикального расстояния между датчиками (до 0,85 м) из-за наклона термокосы, вызываемого интенсивным течением.

Использовались два метода оценки амплитуды ВВ. В первом методе предполагалось, что в отсутствие ВВ значение температуры T_m ($1 \leq m \leq 21$) на любом из датчиков квазипостоянно (мало меняется во времени). При прохождении цуга ВВ оно периодически изменяется от T_{m0} ($t = 0$), невозмущенное значение, до $T_{m\tau}$ ($t = \tau$), максимально измененное значение, где t – текущий момент времени, а τ – половина периода колебания. Оценивалась разница $\Delta T_m = T_{m0} - T_{m\tau}$ и подбиралось такое различие температуры $\Delta T_{mk} = T_m(0) - T_k(0)$ между датчиками на горизонтах m и k в невозмущенных условиях, что $\Delta T_{mk} \approx \Delta T_{m\tau}$. Принималось, что амплитуда ВВ на горизонте m $a = (m - k)\Delta z$ по модулю. Очевидно, что минимально определяемое данным методом значение a составляет Δz , т. е. позволяет определять амплитуду ВВ, превышающую 0,85–1,05 м. Эта величина является погрешностью определения амплитуды на горизонте m .

При другом методе оценки амплитуды ВВ, более привычном для океанологов, использовалось изменение положения избранной изотермы во времени. Оценивалось ее вертикальное смещение от начального положения при $t = 0$ до максимального отклонения при $t = \tau$. Поскольку при построении изотерм

по показаниям термодатчиков на фиксированных горизонтах ошибка определения положения изотерм также может достигать значения Δz в пределах 0,85–1,0 м, погрешность при использовании как первого, так и второго метода приблизительно одинакова.

Оба метода оценки дали хорошо сопоставимые результаты. В конечном счете для оценки амплитуды (размаха) ВВ использовался первый из рассмотренных выше методов.

Фазовая скорость ВВ c (модуль и направление) рассчитывалась по алгоритму, описанному в [33]. В этом алгоритме используются значения времени задержки прохождения определенной фазы ВВ через две другие термоксы относительно начальной фазы.

Длина волны λ рассчитывалась исходя из ее определения, из которого следует, что $\lambda = c \cdot T_{iw}$.

Средние значения параметров λ , c , T_{iw} и a для каждого наблюдавшегося цуга ВВ приведены в таблице. Там же приведены значения средней по глубине водного слоя частоты Вьяйсяля – Брента N_T , рассчитанные по температурному профилю с использованием формулы

$$N_T = \sqrt{g\alpha \frac{\Delta T}{H_o}}$$

где α – коэффициент термического расширения (КТР) морской воды; T – температура; ΔT – перепад температуры между верхним и нижним датчиками; H_o – глубина места, которая считается постоянной на масштабе полигона и равной 26 м. В таблице также приводятся значения еще одного параметра H_c – толщины слоя, в котором наблюдались внутриволновые колебания (см. рис. 5).

Первичные значения коэффициента термического расширения морской воды α в зависимости от значений ее температуры были взяты из табл. 4.1 издания¹. Более точные его значения были получены интерполяцией данных для солености вод, характерной для шельфовой зоны Черного моря в Геленджикском районе.

Всего за период исследований удалось выявить 56 цугов ВВ. В таблице представлены те из них, которые были использованы для анализа их фазовой скорости (29 цугов). Отфильтрованы были цуги ВВ, зарегистрированные только на одной или двух термоксах, а также те цуги, которые состояли менее чем из трех волн.

Сравнение периода внутриволновых колебаний T_{iw} с периодом свободных колебаний частиц в стратифицированной водной среде Вьяйсяля – Брента $T_{VB} = 2\pi/N_T$ показало, что в подавляющем большинстве случаев $T_{iw} > T_{VB}$, как это и должно быть для внутренних волн. Однако есть и исключения, они могут быть связаны с неучетом соленостной стратификации, которая в весенний сезон года может составлять одну треть термической стратификации [34], а также с влиянием скорости течения.

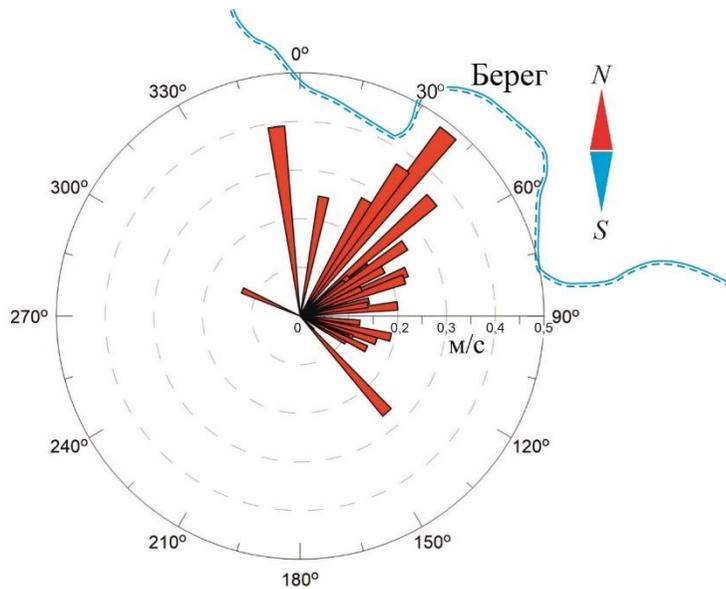
¹ Океанографические таблицы / [Исполн. В. И. Кондратьева]. 4-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1975. 477 с.

Характеристики ВВ, полученные в ходе исследований
IW characteristics resulted from the studies

Дата / Date	$T_{iw}, c /$ T_{iw}, s	$c, м/с /$ $c, m/s$	$\lambda, м /$ λ, m	$\alpha \cdot 10^4$	$H_c, м /$ H_c, m	$N_T, 1/c /$ $N_T, 1/s$	$\Delta T, ^\circ C$	$\alpha, м /$ α, m
26.04.2018	600	0,06	39	1,96	10,5	0,0132	2,38	6,5
28.04.2018	320	0,13	41	1,75	15,0	0,0116	2,03	4,3
29.04.2018	700	0,12	86	1,88	9,0	0,0151	3,22	4,9
30.04.2018	514	0,06	29	1,85	18,5	0,0113	1,83	7,6
01.05.2018	440	0,17	76	1,89	16,0	0,0111	1,75	2,7
02.05.2018	600	0,17	104	1,89	17,5	0,0159	3,56	4,3
03.05.2018	432	0,14	62	1,95	13,0	0,0167	3,81	3,3
04.05.2018	554	0,05	25	1,97	10,5	0,0181	4,42	4,3
04.05.2018	451	0,11	49	1,94	8,0	0,0175	4,16	2,2
05.05.2018	600	0,09	51	1,92	16,0	0,0163	3,64	5,4
12.05.2018	300	0,09	28	1,84	20,5	0,0136	2,66	7,6
14.05.2018	480	0,07	34	2,05	23,5	0,0129	2,16	3,3
19.05.2018	352	0,09	30	2,17	15,0	0,0229	6,43	4,9
20.05.2018	400	0,36	144	2,12	12,5	0,0225	6,32	3,3
28.05.2018	467	0,08	39	2,12	15,0	0,0147	2,71	4,3
28.05.2018	467	0,19	89	2,06	20,5	0,0165	3,49	2,2
28.05.2018	400	0,27	110	2,05	15,0	0,0186	4,48	2,2
29.05.2018	338	0,11	36	1,96	23,5	0,0166	3,73	8,7
31.05.2018	600	0,10	58	2,03	10,5	0,0088	1,02	8,7
01.06.2018	520	0,14	73	1,9	8,0	0,0103	1,49	2,2
01.06.2018	533	0,10	51	1,86	9,0	0,0111	1,76	7,6
02.06.2018	450	0,27	120	1,92	15,0	0,0143	2,85	4,3
07.06.2018	255	0,27	58	2,49	15,0	0,0271	7,86	2,2
07.06.2018	379	0,15	57	2,51	17,0	0,0268	7,58	3,3
29.04.2019	808	0,13	101	1,66	21,0	0,0114	2,09	5,4
30.04.2019	417	0,13	53	1,71	21,0	0,0139	2,97	2,2
30.04.2019	480	0,12	55	1,69	21,0	0,0151	3,57	2,7
26.05.2019	427	0,37	157	2,27	18,0	0,0256	7,67	6,5
15.06.2019	600	0,39	235	2,79	12,5	0,0397	14,98	8,7

Величина фазовой скорости ВВ и ее направление показаны на рис. 8.

Из рисунка видно, что подавляющее большинство цугов ВВ распространяется в сторону берега. Тем не менее видно, что некоторые цуги волн распространялись преимущественно вдоль берега.



Р и с. 8. Направление распространения и модуль скорости ВВ
Fig. 8. IW propagation direction and velocity module

Параметризация фазовой скорости внутренних волн

В глубоком двуслойно-стратифицированном по температуре море, где $H_c/H_o \ll 1$ и $\lambda/H_o \ll 1$, из соображений размерности и автомодельности фазовая скорость ВВ должна определяться выражением

$$c = A\sqrt{g'H_c}.$$

Здесь A – числовая константа; $g' = g\Delta T$, где ΔT – скачок температуры на границе слоев; H_c – толщина «теплого» слоя, на границе которого наблюдаются ВВ; H_o – глубина моря.

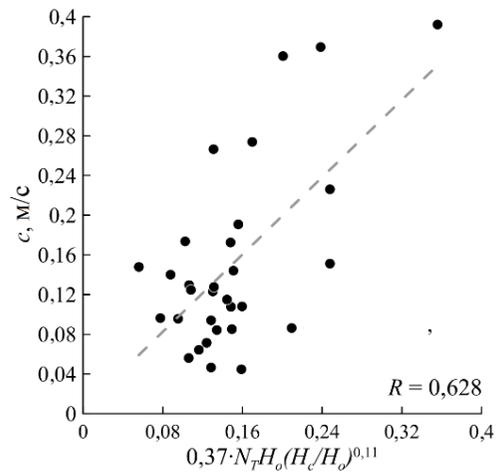
Однако на сравнительно мелководном шельфе приведенные выше неравенства не выполняются. Будем полагать, что в нашем случае зависимость фазовой скорости ВВ от внешних параметров определяется выражением

$$c = AN_T H_o \left(\frac{H_c}{H_o}\right)^m. \quad (1)$$

В выражении (1) используется предположение, что фазовая скорость пропорциональна произведению средней по толщине водного слоя частоты плаучести N_T , толщины водного слоя H_o и степенного безразмерного параметра H_c/H_o , где H_c – толщина слоя, в котором наблюдаются ВВ, а H_o – глубина места. При этом A, m – числовые константы, значения которых нужно определить с помощью анализа данных измерений.

Для определения константы m проанализируем зависимость $c = AN_T H_o \left(\frac{H_c}{H_o}\right)^m$. В результате можем сделать вывод, что наилучшая корреляция между правой

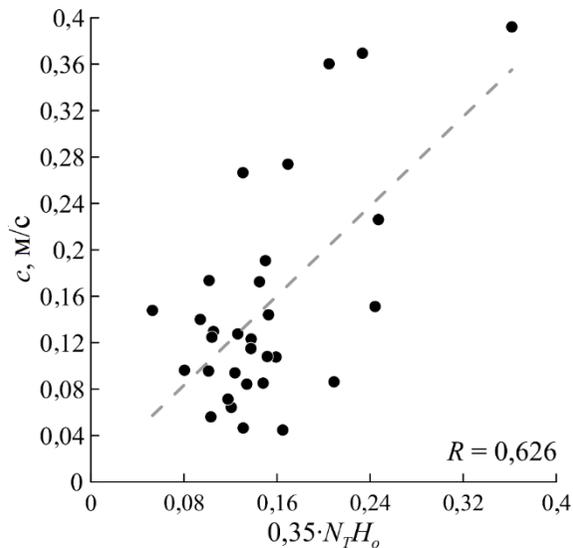
и левой частями данной зависимости достигается при $A = 0,37$ и $m = 0,11$ (рис. 9).



Р и с. 9. Регрессионная зависимость c от величины $0,37N_T H_o \left(\frac{H_c}{H_o} \right)^{0,11}$ с коэффициентом корреляции $R = 0,628$

Fig. 9. Regression dependence of c on value $0,37N_T H_o \left(\frac{H_c}{H_o} \right)^{0,11}$ with the correlation coefficient $R = 0.628$

Поскольку зависимость c от параметра $\frac{H_c}{H_o}$ очень слабая, ей можно пренебречь и считать, что $c = AN_T H_o$ (рис. 10).



Р и с. 10. Корреляционная зависимость c от $AN_T H_o$ при $A = 0,35$ ($R = 0,626$ – коэффициент корреляции)

Fig. 10. Correlation dependence of c on $AN_T H_o$ at $A = 0.35$ ($R = 0.626$ is the correlation coefficient)

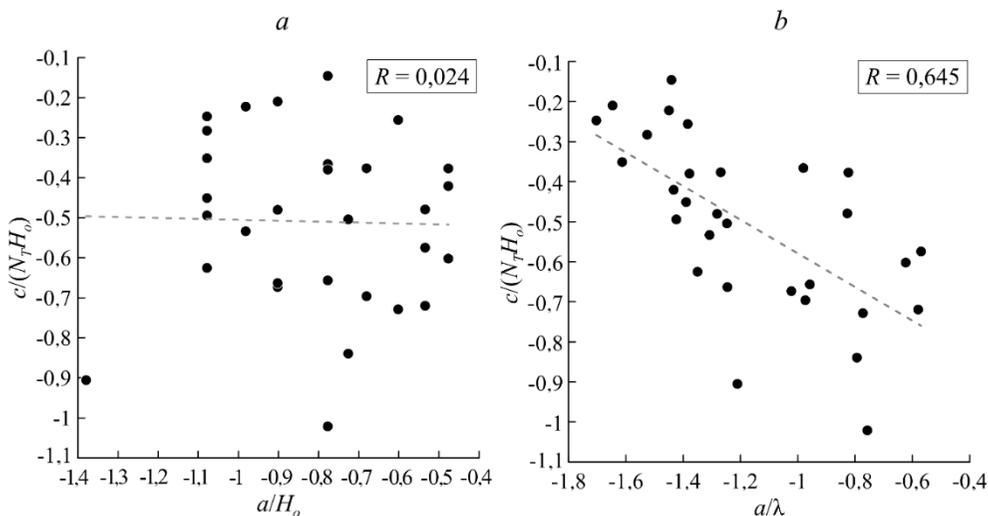
Очевидно, что в статистическом плане данная зависимость обеспечена не хуже, чем более сложная, учитывающая толщину слоя распространения ВВ. К тому же полученная зависимость неплохо соответствует теоретической:

$$c = \frac{N_T H_0}{\pi}.$$

Отсюда следует, что на внутреннем шельфе скорость распространения ВВ главным образом определяется средней по глубине стратификацией водного слоя и толщиной этого слоя. Это делает возможной оценку фазовой скорости ВВ по глубине места и среднему градиенту температуры без использования при этом дополнительных данных.

Поскольку выбранные нами цуги ВВ в основном обладали значительной амплитудой колебаний, имеет смысл проверить зависимость фазовой скорости распространения волн от их амплитуды, а вернее, от параметров a/H_0 и a/λ . При этом первый параметр в некоторой степени характеризует влияние динамического сопротивления сравнительно мелководной среды распространяющимся высокоамплитудным волнам, а второй – влияние нелинейности волны на скорость ее распространения.

Зависимости величины $c/(N_T H_0)$ от a/H_0 и a/λ в логарифмических координатах представлены на рис. 11.



Р и с. 11. Зависимость величины $c/(N_T H_0)$ от a/H_0 (а) и от a/λ (б). Штриховая линия – линия регрессии

F i g. 11. Dependence of value $c/(N_T H_0)$ on a/H_0 (a) and on a/λ (b). Dashed line is the regression line

Из рис. 11, а видно, что зависимость безразмерной фазовой скорости волн от параметра a/H_0 практически отсутствует и ей можно пренебречь. А вот параметр нелинейности волны (рис. 11, б) существенно влияет на скорость ее

распространения, причем более нелинейные волны распространяются медленнее, чем менее нелинейные. Физический смысл этой зависимости авторам не ясен и нуждается в дальнейшем исследовании.

В результате уточненную зависимость фазовой скорости распространения ВВ от параметров $N_T H_o$ и a/λ можно представить в виде

$$c = 0,07 N_T H_o \left(\frac{a}{\lambda} \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

График этой зависимости изображен на рис. 12. Из него видно, насколько улучшилась корреляционная связь между измеренной фазовой скоростью ВВ и ее параметризацией.

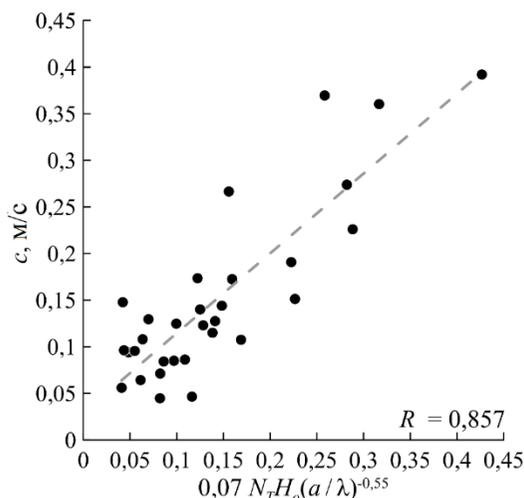


Рис. 12. Уточненная зависимость фазовой скорости от параметров $N_T H_o$ и a/λ
Fig. 12. Refined dependence of phase velocity on parameters $N_T H_o$ и a/λ

Как уже отмечалось, впоследствии желательно учесть в оценке частоты Вайсяля – Брента не только температурный, но и солёностный вклад в плотность и рассчитывать скорость распространения ВВ на основе ее оценки по «полному» градиенту плотности. Кроме того, представляется важным учесть влияние скорости течения на скорость распространения ВВ. Поскольку распространение ВВ было направлено в основном перпендикулярно берегу, а составляющая скорости течения в этом направлении невелика [35], то, по-видимому, влияние скорости течения в большинстве случаев было незначительным. Тем не менее постараемся его учесть при дальнейшей работе.

В заключение отметим, что, хотя механизмы образования наблюдавшихся цугов внутренних волн, скорее всего, были различными, их появление в области кластера во многих случаях предвлялось сменой знака скорости течения (рис. 13, 14). Скорость течения измерялась в области кластера с помощью донного акустического доплеровского профилографа течения (ADCP), также подключенного к мультимодемной станции. Как известно, смена знака скорости

течения в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря наиболее часто происходит вследствие меандрирования Основного Черноморского течения и образования мезомасштабных антициклонических вихрей [35]. На рис. 13 и 14 представлены случаи, когда северо-западное направление течения изменялось на юго-восточное перед появлением цугов ВВ. Это означает, что цуги ВВ наблюдались, по-видимому, во фронтальных зонах антициклонических вихрей. Данное предположение согласуется с ранее высказанным о том, что многие цуги ВВ наблюдаются в области языков более теплых или более холодных вод, вторгающихся на акваторию кластера. Возможно, что эти языки и порождающие их вихри являются энергетическим источником ВВ, как это ранее указывалось в [15], однако этот вопрос требует специального исследования.

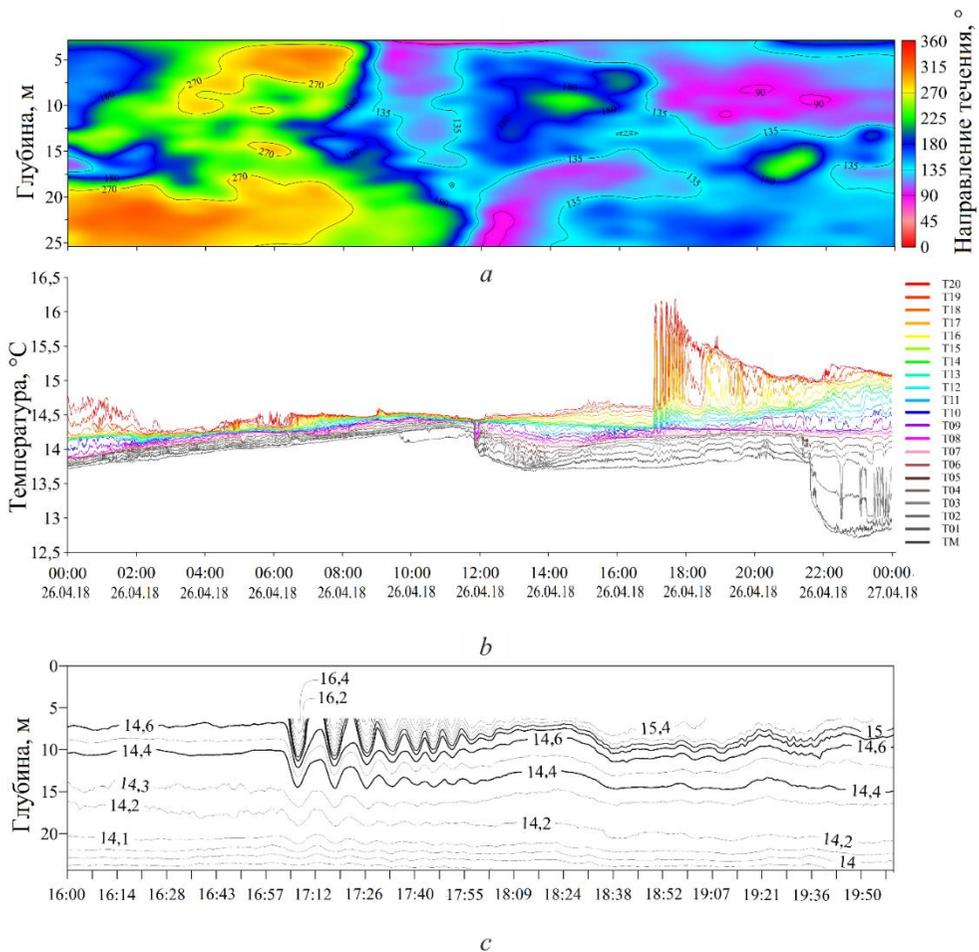
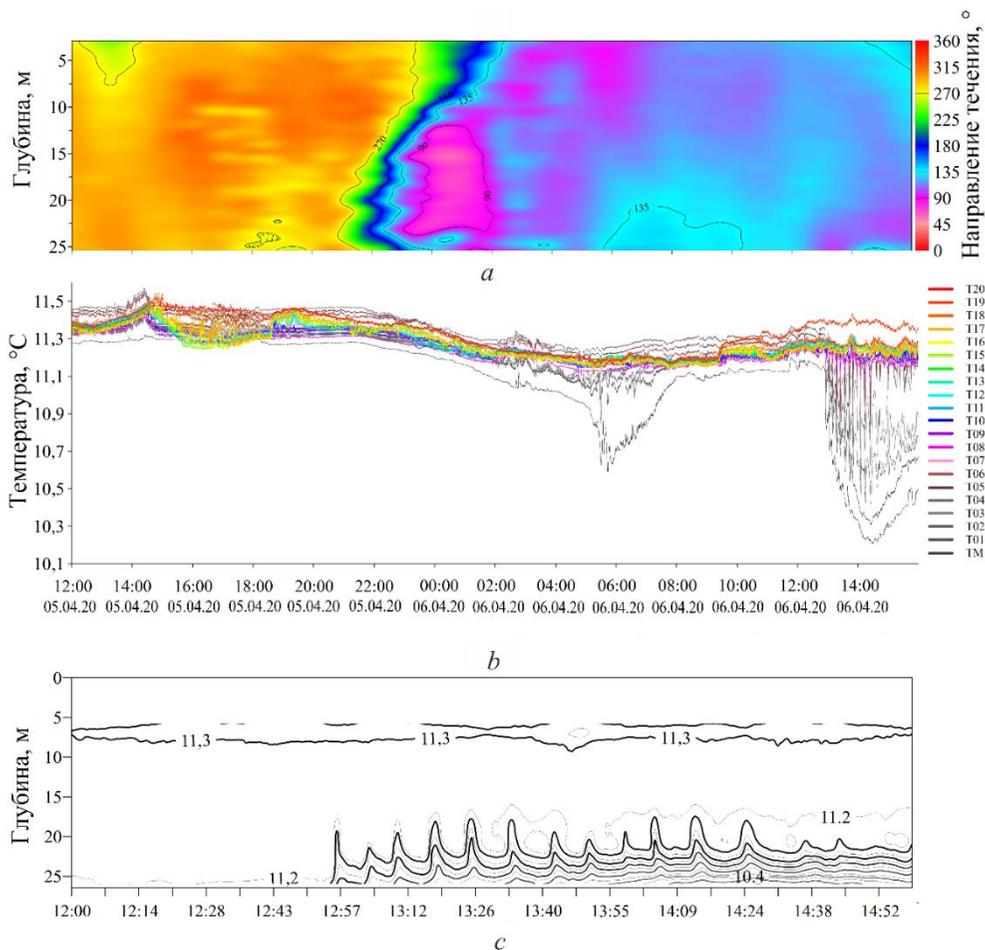


Рис. 13. Представление совмещенных во времени данных измерений ADCP (распределение по вертикали и во времени направления течения) (a); показания термодатчиков термокосы B 26 апреля 2018 г. (сверху вниз: T20 – TM – термодатчики, где T20 – верхний датчик, TM – придонный) (b); колебания изотерм в цуге ВВ в верхнем слое с 17:00 до 18:00 (c)

Fig. 13. Representation of the time-coupled ADCP measurement data (vertical and temporal distribution of current direction) (a); readings of the thermoresistor chain B thermal sensors on April 26, 2018 (from top to bottom: T20 – TM are the thermal sensors where T20 is the top sensor and TM is the bottom one) (b); isotherm fluctuations in the IW package in the upper layer from 17:00 to 18:00 (c)



Р и с. 14. Представление совмещенных во времени данных измерений ADCP (распределение по вертикали и во времени направления скорости течения) (a); показания термодатчиков термокосы В 06 апреля 2020 г. (обозначения см. рис. 13) (b); колебания изотерм в цуге ВВ в нижнем слое в период с 13:00 до 15:00 (c)

F i g. 14. Representation of the time-coupled ADCP measurement data (vertical and temporal distribution of the current velocity direction) (a); readings of thermoresistor chain B thermal sensors on April 6, 2020 (see designations in Fig. 13) (b); isotherm fluctuations in the IW package in the lower layer from 13:00 to 15:00 (c)

Основные результаты и выводы

1. Выполнен анализ пространственно-временной изменчивости температурной стратификации вод на внутреннем шельфе Черного моря на основе данных измерений кластера термокос, изготовленных в Южном отделении Института океанологии Российской академии наук. Измерения проводились в 2018–2020 гг. Кластер состоял из трех термокос на заякоренных буйковых станциях, установленных на глубинах 24–28 м в вершинах треугольника со сторонами длиной 40–130 м. Термокосы длиной около 20 м производили частые (раз в 10 секунд) измерения температуры с помощью чувствительных датчиков, расположенных по вертикали со скважностью менее 1 м.

2. Установлено, что одним из факторов, вызывающих сильную коротко-периодную изменчивость температурной стратификации в весеннее и ранне-летнее время (апрель – июнь), являются цуги ВВ. Обработка данных измерений позволила выявить 56 цугов ВВ за весь период измерений. В указанный сезон года цуги ВВ наблюдались 7–10 раз в месяц. В летний и осенние сезоны года случаи появления ВВ на внутреннем шельфе были существенно более редкими, возможно из-за заглупления верхнего квазиоднородного слоя и опускания термоклина на дно.

3. Рассчитаны значения периода ВВ, длины и амплитуды, значение и направление их фазовой скорости распространения, а также оценено количество ВВ в цуге. Оказалось, что преимущественно ВВ распространяются из глубоководной части моря к берегу и часто обнаруживаются во фронтальных зонах, связанных с вторжением более теплых или более холодных вод на акваторию кластера. Значения модуля фазовой скорости ВВ изменялись в диапазоне от 5 до 40 см/с. При этом длина волны изменялась от 25 до 250 м, амплитуда – от 1 до 10 м. Количество волн в цуге варьировалось от 3 до 16. Одиночные волновые возмущения не принимались в расчет.

4. Установлена статистически обеспеченная зависимость фазовой скорости ВВ от параметров температурной стратификации, глубины моря в области расположения кластера, а также от параметра нелинейности волны. Она имеет вид $c = 0,07 N_T H_o \left(a/\lambda \right)^{-\frac{1}{2}}$. Из этой зависимости следует, что с увеличением параметра нелинейности фазовая скорость распространения ВВ уменьшается. Данный факт нуждается в физическом объяснении.

5. Хотя механизмы образования наблюдавшихся цугов ВВ, скорее всего, были различными, их появление в области кластера часто предварялось сменной знака скорости течения. В ряде случаев цуги ВВ наблюдались во фронтальных зонах антициклонических вихрей. Возможно, эти вихри являются энергетическим источником образования ВВ. Однако этот вопрос требует дальнейшего исследования.

6. В будущем представляется важным учитывать в оценке стратификации водного слоя не только температурный, но и соленостный вклад в плотность и рассчитывать скорость распространения ВВ на основе оценки частоты Вьяйсяля – Брента по градиенту плотности. Кроме того, представляется важным учесть влияние скорости течения на скорость распространения ВВ.

7. Целесообразно установить дополнительный кластер термокоч вне шельфовой зоны на глубокой воде с тем, чтобы дно не ограничивало положение термоклина и присущие ему внутриволновые колебания, и исследовать статистику и физические закономерности появления цугов ВВ на протяжении всего теплого периода года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря / А. Г. Зацепин [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 1. С. 16. EDN RTOUUT. doi:10.7868/S0002351513060163
2. *Коняев К. В., Сабинин К. Д.* Волны внутри океана. СПб. : Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
3. *Сабинин К. Д., Серебряный А. Н., Назаров А. А.* Интенсивные внутренние волны в Мировом океане // Океанология. 2004. Т. 44, № 6. С. 805–810. EDN OWMMP.
4. *Бондур В. Г., Серебряный А. Н., Замшин В. В.* Аномальный цуг внутренних волн рекордных высот на шельфе Черного моря, генерируемый атмосферным фронтом // Доклады Академии наук. 2018. Т. 483, № 4. С. 431–436. EDN YTJGLR. doi:10.31857/S086956520003282-3
5. Интенсивные внутренние волны аномальных высот на шельфе Черного моря / В. Г. Бондур [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 1. С. 114–127. EDN EMZTKT. doi:10.31857/S0002-3515551114-127
6. *Бышев В. И., Иванов Ю. А., Морозов Е. Г.* Исследование флуктуаций температуры в диапазоне частот внутренних гравитационных волн // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7, № 1. С. 41–49.
7. *Иванов В. А., Лисиченко А. Д.* Внутренние волны в шельфовой зоне и у кромки шельфа в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 6. С. 67–73.
8. *Иванов В. А., Лисиченко А. Д.* К механизму генерации короткопериодных внутренних волн пульсациями ветра // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зоны и комплексное исследование ресурсов шельфа. Севастополь, 2002. С. 191–196.
9. *Иванов В. А., Серебряный А. Н.* Частотные спектры короткопериодных внутренних волн в бесприливном море // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18, № 6. С. 683–685.
10. *Иванов В. А., Серебряный А. Н.* Внутренние волны на мелководном шельфе бесприливно-го моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19, № 6. С. 661–665.
11. *Иванов В. А., Серебряный А. Н.* Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливно-го моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21, № 6. С. 648–656.
12. *Иванов В. А., Серебряный А. Н.* Проявление внутренних волн малых амплитуд на поверхности моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21, № 7. С. 795–799.
13. *Серебряный А. Н., Иванов В. А.* Тридцать лет исследований внутренних волн с океанографической платформы Морского гидрофизического института НАН Украины // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : МГИ, 2010. Вып. 21. С. 146–156.
14. Экспериментальное исследование колебаний температуры в море в диапазоне частот внутренних гравитационных волн / Ю. А. Иванов [и др.] // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5, № 4. С. 416–425.
15. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д.* Возможные механизмы генерации внутренних волн в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5, т. 2. С. 128–136.
16. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д.* Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 49–55. EDN KYGHST.
17. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д.* Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436, № 3. С. 407–411. EDN NDJRTD.

18. Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря / О. Ю. Лаврова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 4. С. 308–322. EDN RLOLLZ.
19. *Навроцкий В. В., Филлюшкин Б. Н.* Статистический анализ временных колебаний температуры в поверхностном слое моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5, № 7. С. 714–723.
20. *Серебряный А. Н., Химченко Е. Е.* Исследования внутренних волн на кавказском и крымском шельфах Черного моря летом 2013 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 88–104. EDN THXXZR.
21. *Сильвестрова К. П., Зацепин А. Г., Мысленков С. А.* Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 521–530. EDN ZCRXWF. doi:10.7868/S0030157417040013
22. *Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев С. В.* Развитие средств и методов дрейфтерной технологии применительно к проблеме изучения Черного моря // Океанология. 2008. Т. 48, № 1. С. 149–158. EDN IBYVLJ.
23. *Химченко Е. Е., Серебряный А. Н.* Внутренние волны на кавказском и крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.) // Океанологические исследования. 2018. Т. 46, № 2. С. 69–87. EDN YPOJUL. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7
24. Verification of the Ekman Upwelling Criterion with In Situ Temperature Measurements in the Southeastern Baltic Sea / S. Myslenkov [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, iss. 1. 179. <https://doi.org/10.3390/jmse11010179>
25. *Мотыжев С. В., Лунев Е. Г., Толстошеев А. П.* Развитие дрейфтерных технологий и их внедрение в практику океанографических наблюдений в Черном море и Мировом океане // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2011. Вып. 24. С. 259–272.
26. *Серебряный А. Н., Иванов В. А.* Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6, № 3. С. 34–45.
27. *Centurioni L. R.* Observations of large-amplitude nonlinear internal waves from a drifting array: instruments and methods // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2010. Vol. 27, iss. 10. P. 1711–1731. doi:10.1175/2010jtecho774.1
28. *Centurioni L. R.* Drifter technology and impacts for sea surface temperature, sea-level pressure, and ocean circulation studies // Observing the oceans in real time. Cham: Springer, 2017. P. 37–57. doi:10.1007/978-3-319-66493-4_3
29. *Munk W., Wunsch C.* Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1998. Vol. 45, iss. 12. P. 1977–2010. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00070-3)
30. Исследование внутренних волн по данным трех заякоренных термокос / В. В. Очередник [и др.] // Береговая зона моря: исследования, управление, перспективы : сборник материалов Международной молодежной летней школы / Под ред. В. А. Гриценко. Калининград, 2018. С. 12–16. EDN YYTGOT.
31. Многофункциональная система он-лайн мониторинга подводной обстановки / В. И. Баранов [и др.] // Современные методы и средства океанологических исследований : материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «МСОИ-2017». М., 2017. Т. 2. С. 287–289. EDN YSGYPH.
32. Термокосы ЮО ИО РАН: конструкция, методика и результаты метрологического исследования датчиков / В. В. Очередник [и др.] // Океанология. 2018. Т. 58, № 5. С. 719–730. EDN XWVHWH. doi:10.1134/S003015741805009X
33. Примеры подходов к исследованию температурной изменчивости вод шельфа Черного моря при помощи кластера термокос / В. В. Очередник [и др.] // Океанология. 2020. Т. 60, № 2. С. 173–185. EDN YCLUGL. doi:10.31857/S0030157420010189

34. Подымов О. И., Зацепин А. Г. Сезонная и межгодовая изменчивость солености верхнего слоя в Геленджикском районе Черного моря // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 3. С. 370–383. EDN VYLYHR. doi:10.7868/S0030157416020167
35. Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP / А. Г. Зацепин [и др.] // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 5. С. 629–642. EDN РСІКРЈ.

Об авторах:

Очередник Владимир Владимирович, научный сотрудник, лаборатория гидрофизики и моделирования, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36), **SPIN-код: 6522-7608**, **ORCID ID: 0000-0002-3593-7114**, **ResearcherID: G-2850-2017**, **Scopus Author ID: 56520226300**, v.ocherednik@ocean.ru

Зацепин Андрей Георгиевич, главный научный сотрудник, зав. лабораторией экспериментальной физики океана, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 1707-3104**, **ORCID ID: 0000-0002-5527-5234**, **ResearcherID: E-4999-2014**, **Scopus Author ID: 7004260979**, zatsepin@ocean.ru