

УДК: 551.466

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-98-107

Е.Е. Химченко<sup>1</sup>, А.Н. Серебряный<sup>2</sup>, А.А. Коныхова<sup>3</sup>

## КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ НА КРУТОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ ЛЕТОМ 2018 ГОДА

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты анализа данных по наблюдению за короткопериодными внутренними волнами на северо-восточном шельфе Черного моря в июне 2018 г. Исследуемый район отличается узким шельфом с резким свалом глубин, уклон дна составляет 23°.

Измерения велись со стационарного морского павильона Института экологии академии наук Абхазии, где глубина места достигает 13 м. На глубине 52 м была установлена заякоренная станция, оснащенная автономными точечными датчиками температуры.

На платформе велись наблюдения за изменчивостью температурной структуры моря при помощи точечных датчиков температуры, автономного распределенного датчика температуры (РДТ) и вертикальных ежечасных профилирований при помощи зонда. Дополнительно акустическим доплеровским профилометром течений ADCP велась регистрация прибрежных течений у платформы.

В результате анализа установлен частый подход квазиинерционных внутренних волн близко к берегу. Зарегистрированы цуги короткопериодных внутренних волн и уединенные волны, относящиеся к первой моде, а также отдельные проявления внутренних волн второй моды.

Приводятся примеры наблюдаемых волн, а также их параметры. За все время измерений чаще всего регистрировались внутренние волны с периодом 5–10 мин и высотой 1–2 м. Уединенные волны отличались большим периодом и высотой. Установлено, что короткопериодные внутренние волны в месте измерений преимущественно привязаны к подходящим к берегу квазиинерционным внутренним волнам.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** короткопериодные внутренние волны, Черное море, шельф.

---

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский проспект, 117997, д. 36, г. Москва, Россия, *e-mail*: [ekhymchenko@gmail.com](mailto:ekhymchenko@gmail.com)

<sup>2</sup> АО «Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева», ул. Шверника, 4, 117036, г. Москва, Россия, *e-mail*: [serebryany@hotmail.com](mailto:serebryany@hotmail.com)

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия, *e-mail*: [konyuhova.aa@phystech.edu](mailto:konyuhova.aa@phystech.edu)

Elizaveta E. Khimchenko<sup>1</sup>, Andrey N. Serebryany<sup>2</sup>, Anastasia A. Konukhova<sup>3</sup>

## SHORT-PERIOD INTERNAL WAVES ON THE STEEP SHELF OF THE BLACK SEA IN SUMMER 2018

### ABSTRACT

The results of the analysis of data on observation of short-period internal waves on the northeastern shelf of the Black Sea in June 2018 are presented. The study area is distinguished by a narrow shelf with a sharp drop in depths, the bottom slope is 23 °. The measurements were carried out from the stationary marine platform of The Institute of Ecology of the Academy of Sciences of the Abkhazian Republic, where the depth of the site reaches 13 m. An anchored station was installed, equipped with autonomous point temperature sensors at a depth of 52 m. At the platform, the variability of the sea temperature structure was monitored using point temperature sensors, an autonomous line temperature sensor (LTS), and vertical hourly profiling using a probe. In addition, coastal currents were measured by the acoustic Doppler current profiler ADCP equipped near the platform. As a result of the analysis, a frequent approach of near-inertial internal waves close to the coast was revealed. Trains of short-period internal waves and solitary waves related to the first mode, as well as individual manifestations of internal waves of the second mode, were recorded. Examples of observed waves and their parameters are given. During the entire observation period, internal waves with a period of 5–10 min and a height of 1–2 m were most often recorded. Solitary waves were distinguished by a large period and height. It was found that short-period internal waves at the measurement site are predominantly tied to near-inertial internal waves which approach the coast.

**KEYWORDS:** short-period internal waves, the Black Sea, shelf.

### ВВЕДЕНИЕ

Внутренние волны – природный феномен, изучение которого представляет важную научную и практическую значимость, влияя как на физические, так и биологические процессы в шельфовой зоне океанов и морей. Внутренние волны оказывают существенное влияние на вертикальную стратификацию вод, турбулентное перемешивание [Walter *et al.*, 2016], перераспределение питательных веществ [Shea, Broenkow, 1982], и даже на распределение плотности скоплений массовых пелагических рыб [Краснобородько, 2020]. Внутренние волны также воздействуют на распространение акустических сигналов в морской среде [Colosi *et al.*, 2012]. Все это, в конечном счете, сказывается на экологическом состоянии прибрежных морских экосистем [Woodson, 2018].

Короткопериодные внутренние волны – широко распространенное явление на шельфе Мирового океана, генерация которого чаще всего обусловлена нелинейной трансформацией приливных внутренних волн [Jackson, Apel, 2004]. Короткопериодные внутренние волны относятся к высокочастотному диапазону мезомасштабной изменчивости и характеризуются колебаниями в области термоклина (пикноклина) на частотах, близких к частоте Вьяйсяля-Брента (частота плавучести).

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovskii prospect, 36, 117997, Moscow, Russia, *e-mail:* [ekhimchenko@gmail.com](mailto:ekhimchenko@gmail.com)

<sup>2</sup> Andreyev Acoustics Institute, Shvernika st., 4, 117036, Moscow, Russia, *e-mail:* [serebryany@hotmail.com](mailto:serebryany@hotmail.com)

<sup>3</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Institutskiy per. 9, 141701, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia, *e-mail:* [konyuhova.aa@phystech.edu](mailto:konyuhova.aa@phystech.edu)

Хотя Черное море относится к бесприливным морям, здесь удастся регистрировать достаточно интенсивное поле внутренних волн и выделять механизмы их генерации, отличные от приливного [Серебряный, Иванов, 2013]. Внутренние волны имеют определяющее значение для понимания процессов обмена в условиях бесприливногo моря, оказывая существенное влияние на вертикальное перемешивание. Наблюдения за внутренними волнами в Черном море ведутся с середины XX века [Ямпольский, 1960; Иванов и др., 1969; Коняев, Сабинин, 1973] и продолжаются в настоящее время [Химченко, Серебряный, 2018; Иванов и др., 2019, Serebryany et al., 2020]. Помимо контактных измерений, ведется регистрация поверхностных проявлений внутренних волн при помощи дистанционного зондирования. Обзор спутниковых наблюдений внутренних волн в Черном море представлен в работе [Lavrova, Mityagina, 2017]. Хотя в последние годы для наблюдения за полем внутренних волн дистанционные методы выходят на первый план, контактные измерения по-прежнему остаются главным источником новой информации об их структуре и параметрах, при сопутствующих гидрофизических измерениях.

Настоящая работа представляет собой анализ натурных наблюдений за внутренними волнами, зарегистрированными в районе северо-восточного шельфа Черного моря в июне 2018 г.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализируемые данные были получены во время прибрежных экспедиционных работ со стационарного морского павильона Института Экологии академии наук Абхазии, а также в акватории м. Красный маяк (м. Сухумский). Наблюдения велись на протяжении 10 суток, начиная с 11 июня 2018 г. Исследуемый район отличается узким шельфом с резким свалом глубин, средний уклон дна составляет около  $23^\circ$ . Такая специфика батиметрии прибрежной зоны способствует формированию особенностей в гидродинамике наблюдаемых прибрежных процессов, в частности, внутренних волн [Serebryany et al., 2020].

Во время работ нами использовалось следующее оборудование: вертикальные цепочки, оснащенные автономными датчиками температуры DST-centi "Starr-Oddi", стационарно закрепленный акустический доплеровский профилометр течений ADCP "Rio Grande 600 kHz", океанографический минизонд температуры и скорости звука miniSVP фирмы "Valeport", а также автономный распределенный датчик температуры (РДТ) [Денисов, Серебряный, 2019]. У основания платформы на глубине 13 м была установлена заякоренная станция, оборудованная точечными измерителями и автономным РДТ. Запись по времени велась с дискретностью 30 с.

Район проведения работ и схема расстановки станций представлены на рис. 1. Справа показано вертикальное распределение частоты плавучести в месте наблюдений. На глубине 52 м располагалась станция, оснащенная только точечными датчиками температуры.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для района наблюдений характерно регулярное проявление квазиинерционных внутренних волн, которые здесь подходят близко берегу, что обусловлено особенностями рельефа дна. В свою очередь прохождение длинных инерционных внутренних волн сопровождается генерацией короткопериодных внутренних волн [Serebryany et al., 2020].

Рассматриваемый материал хорошо иллюстрирует подход инерционных внутренних волн на мелководье. На рис. 2 представлены записи временной изменчивости температурной структуры водной толщи на глубине 52 м и у платформы за весь срок наблюдений. Заякоренная станция на глубине была установлена 12 июня и поднята 20 июня, соответственно ее запись короче.

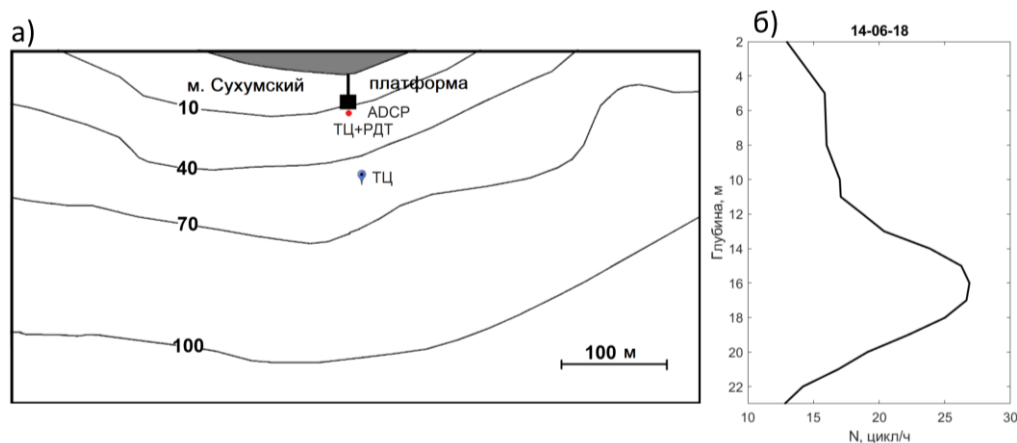


Рис. 1. а) Район проведения работ и схема расстановки станций в июне 2018 г.

б) Вертикальный профиль частоты плавучести 14 июня

Fig. 1. a) The study area and the scheme of stations layout in June 2018

b) The vertical profile of the buoyancy frequency on June 14

На мелководье, в начале наблюдений, термоклин был расположен в приповерхностном слое, к концу измерений, по мере прогревания водной толщи, его положение заглублялось, и 21 июня термоклин оказался на глубине 10 м. На записях температуры прослеживаются хорошо выраженные колебания с периодом, близким к 17–18 ч, что также отмечается и в записях скорости течений. В точке наблюдений локальная инерционная частота составляет 17,6 ч. В первые дни измерений зарегистрирована квазиинерционная волна высотой 6 м. В последующие дни у платформы колебания термоклина с инерционным периодом имели высоты порядка 2–3 м.

На глубоководной станции положение термоклина изменялось в пределах от 25 м до 15 м. В моменты прохождения квазиинерционных внутренних волн положение термоклина смещалось на 5–10 м.

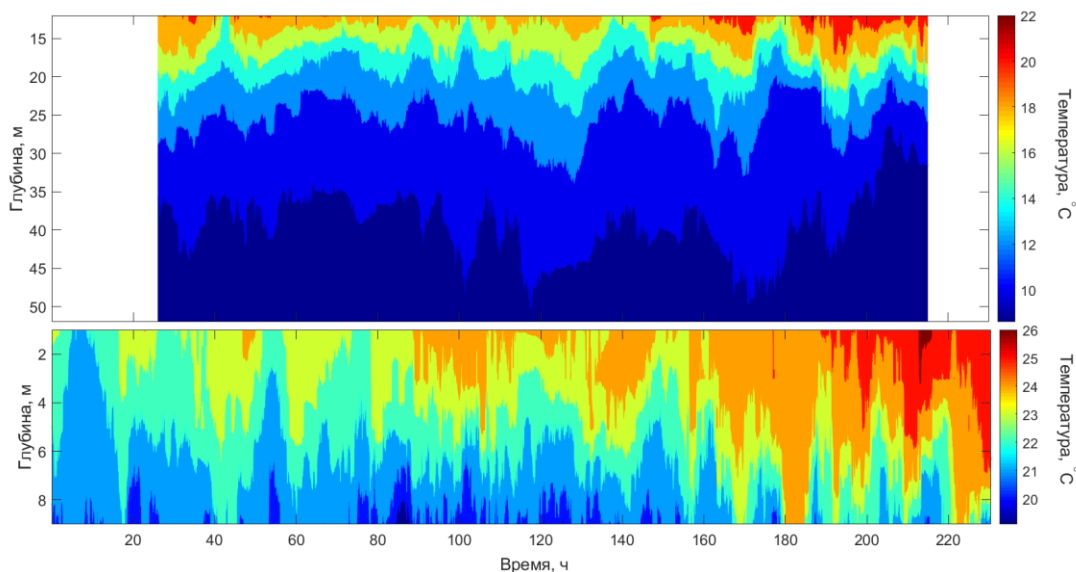


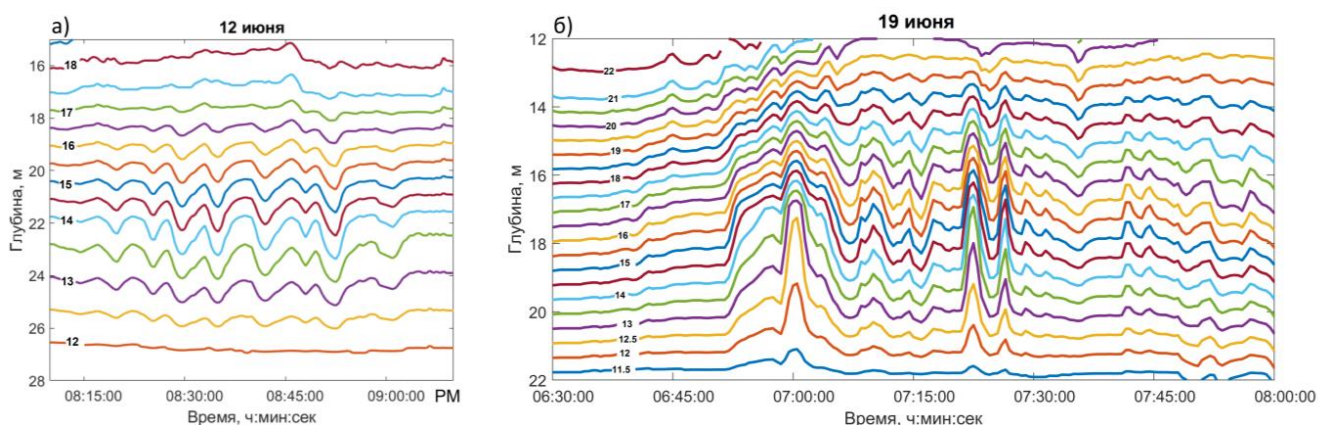
Рис. 2. Временная изменчивость температурной структуры моря по данным цепочки термодатчиков на глубине 52 м и у платформы

Fig. 2. Temporal variability of the sea temperature structure according to the thermistors chains data at 52 m depth and near the platform

На фоне периодических колебаний с инерционной частотой выделяются высокочастотные осцилляции, в большинстве случаев являющиеся проявлением короткопериодных внутренних волн. В качестве примера на рис. 1 представлен профиль частоты плавучести для 14 июня. Максимум частоты Вьясыля-Брента достигал значений 25–27 цикл/ч и располагался на горизонтах от 14 м до 21 м. За девять суток на глубоководной станции было выделено 35 цугов короткопериодных внутренних волн с высотой от 0,5 м и выше. Колебания с меньшей высотой не рассматривались. Приведем последовательно примеры наблюдаемых внутренних волн первой и второй моды, а затем уединенных внутренних волн. Примечательно, что представленные короткопериодные внутренние волны были зарегистрированы на гребнях проходящих квазиинерционных внутренних волн, а уединенные волны – на переднем фронте. В зависимости от расположения пикноклина (термоклина) ближе к поверхности или ко дну моря, относительно всей толщи в месте наблюдений, наблюдаемые волны могут являться волнами углублений или возвышений. Хотя, как показывают натурные данные, в данном районе это «правило» иногда нарушается.

На рис. 3 представлены примеры регистрации короткопериодных внутренних волн первой моды, зарегистрированные на глубоководной станции. На записи от 12 июня цуг короткопериодных волн состоит из 8 колебаний. Осцилляции распространяются на термоклине, расположенном ближе к поверхности, потому имеют форму волн-углублений. Период волн изменяется от 3 мин до 6 мин, а высота достигает 0,5–1 м. Волны с такими параметрами, в целом, являются достаточно типичными для черноморского бассейна.

На рис. 3 б изображен цуг из пяти волн-возвышений, период которых варьируется в пределах 4–10 мин. Хотя термоклин также расположен ближе к поверхности, форма наблюдаемых волн может быть охарактеризована как волны-возвышения (после 6:47 изотермы поднимаются). Головная волна отличается наибольшей высотой – 3,5 м и периодом 10 мин. За ней следуют две волны с периодом 7 мин и 4 мин, высота волн 1 м и 0,5 м соответственно. Затем спустя 10 мин после прошедшего цуга наблюдается следующий, имеющий более выраженные волны с заостренными вершинами, высота этих волн 2–3 м, период 5 мин.



*Рис. 3. Временная изменчивость смещения изотерм 12 июня (а) и 19 июня (б) в момент прохождения короткопериодных внутренних волн первой моды*

*Fig. 3. Temporal variability of the isotherms displacement on June 12 (a) and June 19 (b) during the passage of short-period internal waves of the first mode*

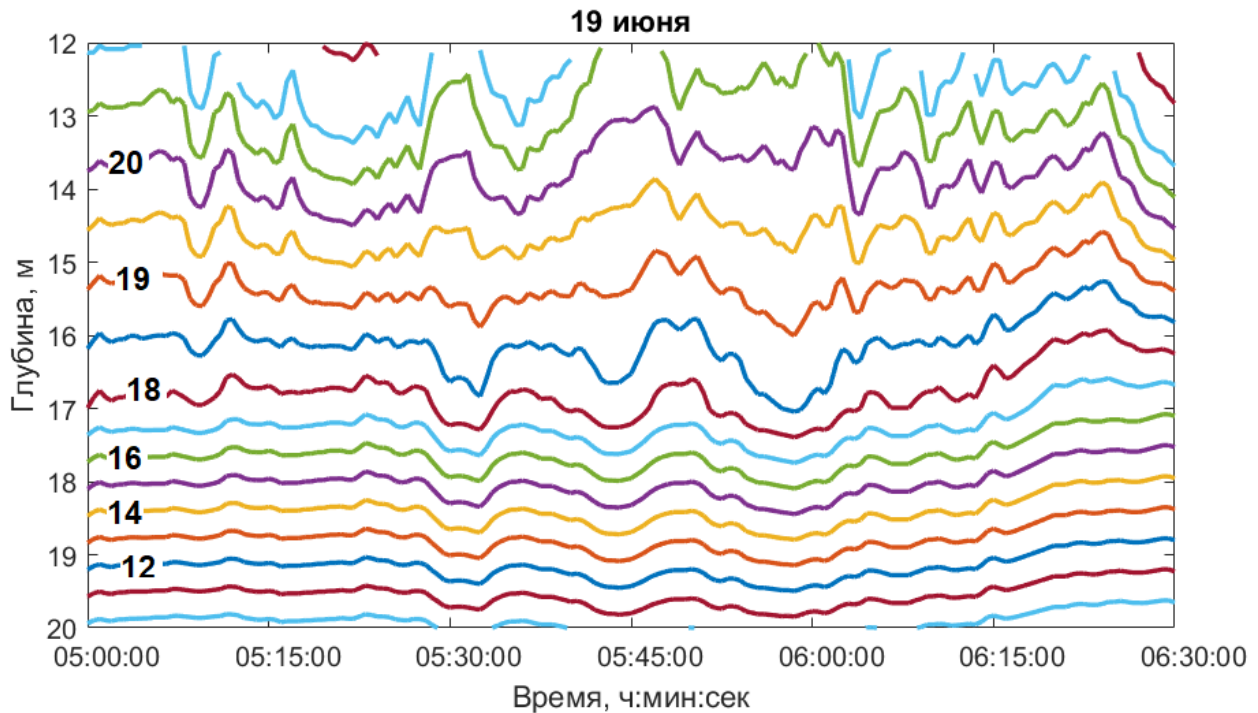


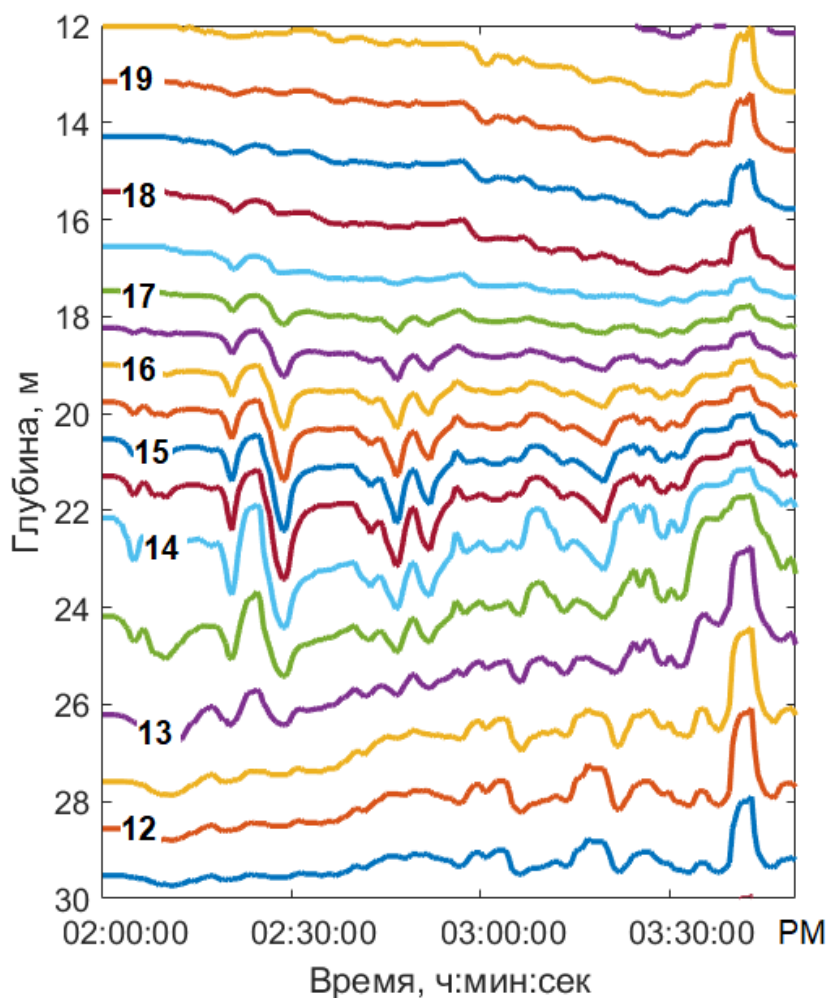
Рис. 4. Временная изменчивость смещения изотерм 19 июня в момент прохождения короткопериодных внутренних волн второй моды

Fig. 4. Temporal variability of the isotherms displacement during the passage of short-period internal waves of the second mode.

Во время летних наблюдений были зарегистрированы короткопериодные внутренние волны, относящиеся ко второй моде (рис. 4). 19 июня от 5:10 ч утра наблюдалось сначала несколько волн-углублений. Вероятно, они в большей степени были выражены в слое выше 12 м, но наши данные ограничены этим горизонтом. Далее от 05:25 ч от горизонта 15 м наблюдается расширение термоклина. На глубине 15 м происходит смещение изотерм вверх, а ниже одновременное заглубление вплоть до горизонта 20 м. Хорошо прослеживаются 2 колебания в виде волн-расширений, их период составил 12 мин. Проявления короткопериодных внутренних волн второй моды в Черном море ранее уже наблюдались [Химченко, Серебряный, 2018; Serebryany et al., 2020]. По данным ADCP известно, что накануне, до регистрации цуга волн второй моды, происходили необычные изменения в вертикальной структуре течений. Наблюдалась резкая смена направления течений с последующей его интенсификацией. Можно предположить, что генерация цуга второй моды обусловлена взаимодействием интенсивного течения с крутым шельфом. Однако это утверждение требует проведения дополнительного анализа.

На рисунке 5 представлены примеры уединенных внутренних волн, зарегистрированных на глубоководной станции. 12 июня периоды незначительных фоновых колебаний перемежались проявлениями одиночных внутренних волн. Первая волна, зарегистрированная около 14:30 имеет период 9 мин и высоту 2 м. Данная волна имеет более крутой передний фронт, что косвенно может указывать на сильную нелинейность процесса. Спустя час на записи во всей толще воды наблюдаются смещения изотерм вверх, вызванные уединенной волной. По своей форме ее можно отнести к волне-возвышения, хотя, как было отмечено выше, пикноклин здесь расположен в слое ближе к поверхности моря. Такое необычное проявление ее формы, возможно, связано с тем, что

данный «солитон» подошел к месту наблюдения из более глубоководной части моря, где имел форму углубления, а подходя к заякоренной станции, вероятно, прошел точку переворота, приняв форму волны-возвышения. Однако, дать точное объяснение, располагая данными лишь в одной точке, невозможно.



*Рис. 5. Временная изменчивость смещения изотерм 12 июня во время прохождения уединенных внутренних волн*

*Fig. 5. Temporal variability of the displacement of isotherms on June 12 during the passage of solitary internal waves*

## ВЫВОДЫ

В работе представлены некоторые результаты анализа натуральных наблюдений внутренних волн, зарегистрированных на крутом шельфе Черного моря в июне 2018 г. На фоне периодических колебаний с инерционной частотой выражены короткопериодные осцилляции, в большинстве случаев являющиеся проявлением высокочастотных внутренних волн. За время наблюдений на глубоководной станции было выделено 35 цугов короткопериодных внутренних волн с высотой от 0,5 м и выше. Чаще всего наблюдались группы внутренних волн первой моды, включающие в себя 3–4 волны высотой 1–2 м и периодом 5–10 мин. В отдельных случаях регистрировались уединенные волны («солитоны»), их период и амплитуда превышали средние значения волн, наблюдаемых в

группах. Это можно объяснить тем, что солитоны внутренних волн отличаются высокой степенью нелинейности. В редких случаях встречались внутренние волны второй моды. Зарегистрированные короткопериодные внутренние волны были сгенерированы на фоне проходящих квазиинерционных внутренних волн.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы госзадания Минобрнауки № 0128-2021-0010, обработка и анализ данных выполнены при поддержке гранта Президента РФ МК-5064.2021.1.5, а также гранта РФФИ № 19-05-00715.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института экологии АНА Кенигсбергеру Г.В. и Нешенко И.П., а также сотруднику Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН Попову О.Е. за помощь в проведении работ и сборе экспериментальных данных.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No 0128-2021-0010, data processing and analysis were carried out with the support of a grant of the President of the Russian Federation МК-5064.2021.1.5, and the Russian Foundation of Basic Research, grant No 19-05-00715.

The authors are grateful to the staff of the Institute of Ecology of the ANA Kenigsberger G.V. and Neshenko I.P., as well as an employee of the Institute of Atmospheric Physics. A.M. Obukhov RAS Popov O.E. for their help in carrying out the work and collecting experimental data.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Денисов Д.М., Серебряный А.Н.* Автономный измеритель внутренних волн на основе распределенного датчика температуры. Приборы и техника эксперимента, 2019. №2. С. 159-160. DOI: 10.1134/S0032816219020058.
2. *Иванов Ю.А., Смирнов Б.А., Тареев Б.А., Филюшкин Б.Н.* Экспериментальные исследования колебаний температуры в море в диапазоне частот внутренних гравитационных волн. Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1969. Т. 5. № 3. С. 416–425.
3. *Иванов В.А., Шульга Т.Я., Багаев А.В., Медведева А.В., Пластун Т.В., Вержеская Л.В., Свищева И.А.* Внутренние волны на шельфе Черного моря в районе Гераклейского полуострова: моделирование и наблюдение. Морской гидрофизический журнал, 2019. Т. 35. № 4 (208). DOI:10.22449/0233-7584-2019-4-322–340.
4. *Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Новые данные о внутренних волнах в море полученные с помощью распределенных датчиков температуры. ДАН СССР, 1973. Т. 209. № 1. С. 86–89.
5. *Краснобородько О.Ю.* Внутренние волны в шельфовой зоне Марокко в осенние периоды 2015 и 2019 годов. Труды АтлантНИРО, 2020. Т. 4. № 2 (10). Калининград: АтлантНИРО. С. 43–57.
6. *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.
7. *Химченко Е.Е., Серебряный А.Н.* Внутренние волны на кавказском и крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.). Океаноло-



- гические исследования, 2018. Т. 46. № 2. С. 69–87. DOI:10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7.
8. Ямпольский А.Д. О внутренних волнах в Черном море по наблюдениям на многослойной якорной станции. Труды ИОАН СССР, 1960. Т. 39. С. 111–126.
  9. Colosi J.A., Duda T.F., Lin Y.T., Lynch J.F., Newhall A.E., Cornuelle B.D. Observations of sound-speed fluctuations on the New Jersey continental shelf in the summer of 2006. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012. V. 131. № 2. P. 1733–1748.
  10. Jackson C.R., Apel J. An atlas of internal solitary-like waves and their properties. Contract, 2004. Электронный ресурс: [http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2\\_index.html](http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html) (дата обращения 27.04.2021).
  11. Lavrova O., Mityagina M. Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas. Remote Sensing, 2017. V. 9. № 9. P. 892. DOI:10.3390/rs9090892.
  12. Serebryany A., Khimchenko E., Popov O., Denisov D., Kenigsberger G. Internal Waves Study on a Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using the Spatial Antenna of Line Temperature Sensors. Journal of Marine Science and Engineering, 2020. V. 8. № 11. P. 833. DOI:10.3390/jmse8110833.
  13. Shea R.E., Broenkow W.W. The role of internal tides in the nutrient enrichment of Monterey Bay, California. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1982. V. 15. № 1. P. 57–66.
  14. Walter R.K., Phelan P.J. Internal bore seasonality and tidal pumping of subthermocline waters at the head of the Monterey submarine canyon. Continental Shelf Research, 2016. V. 116. P. 42–53. DOI: 10.1016/j.csr.2016.01.015.
  15. Woodson C. B. The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems. Annual Review of Marine Science, 2018. V. 10. P. 421–441. DOI:10.1146/annurev-marine-121916-063619.

#### REFERENCES

1. Colosi J.A., Duda T.F., Lin Y.T., Lynch J.F., Newhall A.E., Cornuelle B.D. Observations of sound-speed fluctuations on the New Jersey continental shelf in the summer of 2006. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012. V. 131. No 2. P. 1733–1748.
2. Denisov D.M., Serebrjanyj A.N. Autonomous internal wave meter based on a distributed temperature sensor. Instruments and experimental techniques, 2019. No 2. P. 159–160. DOI: 10.1134/S0032816219020058. (in Russian).
3. Himchenko E.E., Serebrjanyj A.N. Internal waves on the Caucasian and Crimean shelves of the Black Sea (according to summer-autumn observations of 2011–2016). Oceanological research, 2018. Т. 46. No 2. P. 69–87. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7 (in Russian).
4. Ivanov Ju.A., Smirnov B.A., Tareev B.A., Filjushkin B.N. Experimental studies of temperature fluctuations in the sea in the frequency range of internal gravitational waves. Izv. of the USSR Academy of Sciences. Atmospheric and Ocean physics, 1969. Т. 5. No 3. P. 416–425 (in Russian).
5. Ivanov, V.A., Shul'ga, T.Ja., Bagaev, A.V., Medvedeva, A.V., Plastun, T.V., Verzhetskaja, L.V., Svisheva, I.A. Internal waves on the Black Sea shelf in the area of the Heraclea Peninsula: modeling and observation. Marine Hydrophysical Journal, 2019. Т. 35. No 4 (208). DOI: 10.22449/0233-7584-2019-4-322-340 (in Russian).
6. Jackson C.R., Apel J. An atlas of internal solitary-like waves and their properties. Contract, 2004. Электронный ресурс: [http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2\\_index.html](http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html) (дата обращения 27.04.2021).
7. Jampol'skij A.D. About internal waves in the Black Sea from observations at a multi-day anchor station. Trudy IOAN SSSR, 1960. Т. 39. P. 111–126 (in Russian).

8. *Konjaev K.V., Sabinin K.D.* New data on internal waves in the sea obtained using distributed temperature sensors. DAN SSSR, 1973. T. 209. No 1. P. 86–89.
  9. *Krasnoborod'ko O.Ju.* Internal waves in the offshore zone of Morocco in the autumn periods of 2015 and 2019. Trudy AtlantNIRO, 2020. T. 4. № 2 (10). Kaliningrad: AtlantNIRO. P. 43–57 (in Russian).
  10. *Lavrova O., Mityagina M.* Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas. Remote Sensing, 2017. V. 9. No. 9. P. 892. DOI:10.3390/rs9090892.
  11. *Serebrjanyj A.N., Ivanov V.A.* Studies of internal waves in the Black Sea from the MGI oceanographic platform. Fundamental and applied hydrophysics, 2013. T. 6. № 3. P. 34–45 (in Russian).
  12. *Serebryany A., Khimchenko, E., Popov, O., Denisov, D., Kenigsberger, G.* Internal Waves Study on a Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using the Spatial Antenna of Line Temperature Sensors. Journal of Marine Science and Engineering, 2020. V. 8. No 11. P. 833. DOI: 10.3390/jmse8110833.
  13. *Shea R.E., Broenkow W.W.* The role of internal tides in the nutrient enrichment of Monterey Bay, California. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1982. V. 15. No 1. P. 57–66.
  14. *Walter R.K., Phelan P.J.* Internal bore seasonality and tidal pumping of subthermocline waters at the head of the Monterey submarine canyon. Continental Shelf Research, 2016. V. 116. P. 42–53. DOI: 10.1016/j.csr.2016.01.015.
  15. *Woodson C.B.* The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems. Annual Review of Marine Science, 2018. V. 10. P. 421–441. DOI:10.1146/annurev-marine-121916-063619.
-