

Стационарная измерительная система на базе термопрофилемеров на океанографической платформе для определения параметров внутренних волн: результаты испытаний

П. В. Гайский

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
e-mail: gaysky@inbox.ru*

Аннотация

С июня 2021 по август 2022 г. на океанографической платформе в п. Качивели непрерывно проводились испытания экспериментальной измерительной системы для мониторинга динамики температурных изменений в прибрежной зоне. Система построена на трех идентичных по конструкции и электронным компонентам распределенных датчиках температуры (термопрофилемерах), вертикально установленных на пространственном базисе равностороннего треугольника со стороной 18 м. Получены непрерывные пространственно-временные данные о вертикальных профилях температуры до глубины 19.5 м. Корреляция данных одновременных измерений датчиками при выраженной динамике градиентов температур позволила дополнительно к амплитуде и периоду колебательных процессов рассчитать длину, скорость и направление распространения внутренних волн. Данные измерений с выраженными временными фронтами изменения профилей температур позволили рассчитать направление и скорость переноса водных масс на горизонтах. Разработаны программные алгоритмы автоматического расчета указанных параметров для коррелированных показателей пространственно-временного смещения рассчитанных изотерм. Результаты экспериментов доказали возможность использования предложенной системы на базе термопрофилемеров с заданными техническими характеристиками, установленных на ограниченном габаритами океанографической платформы пространственном базисе, для определения параметров внутренних волн и температурной изменчивости с выраженными фронтами.

Ключевые слова: распределенный датчик температуры, термопрофилемер, изотерма, теплота, термоклин, внутренние волны, поле температуры, теплообмен, термокоса, океанографическая платформа, градиент температуры

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2021-0004.

© Гайский П. В., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Гайский П. В. Стационарная измерительная система на базе термопрофилемеров на океанографической платформе для определения параметров внутренних волн: результаты испытаний // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 98–112. EDN TSHDME.

Thermoprofiler-Based Stationary Measuring System on the Oceanographic Platform for Determining Internal Wave Parameters: Testing Results

P. V. Gaisky

*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: gaysky@inbox.ru*

Abstract

An experimental system for monitoring the dynamics of temperature changes in the coastal zone was tested at the oceanographic platform in the village of Katsiveli (Crimea) continuously for more than a year from 2021 to 2022. The created system was based on three distributed temperature sensors (thermoprofilometers) identical in design and electronics. (thermal copolymer), vertically installed on the spatial basis of an equilateral triangle with a side of 18 m. Continuous spatiotemporal data on vertical temperature profiles up to a depth of 19.5 m were obtained. Data correlation of simultaneous measurements of sensors with pronounced dynamics of temperature gradients allowed to calculate, in addition to the amplitude and period of oscillatory processes, the length, velocity and direction of internal wave propagation. Measurement data with pronounced time fronts of temperature changes made it possible to calculate the direction and speed of transfer of water masses on horizons. Software algorithms for automatic calculation of specified parameters for correlated indicators of space-time displacement of calculating isotherms have been developed. The results of the experiments proved the possibility of using a system with the specified technical characteristics of thermal profiles installed on a spatial basis limited by the dimensions of the oceanographic platform to measure the parameters of internal waves and temperature variability with pronounced fronts.

Keywords: distributed temperature sensor, thermoprofiler, isotherm, heat storage, thermocline, internal waves, temperature field, heat exchange, thermistor chain, oceanographic platform, temperature gradient

Acknowledgements: the research was performed under state assignment on topic no. FNNN-2021-0004.

For citation: Gaisky, P.V. 2024. Thermoprofiler-Based Stationary Measuring System on the Oceanographic Platform for Determining Internal Wave Parameters: Testing Results. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 98–112.

Введение

Мониторинг и изучение гидродинамических процессов в прибрежной зоне с выраженными градиентами температуры воды невозможны без пространственно-временной привязки. Непрерывные во времени измерения вертикальных профилей температуры позволяют наблюдать мелкомасштабную изменчивость температуры воды и определять амплитуду и период подповерхностных волновых процессов [1–11]. Для определения направления распространения, длины и скорости внутренних волн, а также направления и скорости переноса водных масс, сопровождающихся выраженными температурными

фронтами, необходима измерительная система из пространственно скоординированных в трехмерном поле датчиков температуры. Такие датчики должны иметь идентичные по точности и инерционности метрологические характеристики с достаточно высокой частотой опроса (не менее 0.1 Гц). При долгосрочном мониторинге механическое зондирование прецизионными измерителями или создание сети аналоговых точечных датчиков – сложное и дорогостоящее решение, которое не может обеспечить синхронность измерений. Поэтому для этих целей часто используют гирлянды точечных цифровых датчиков [12, 13] и термокос на базе аналоговых датчиков [7, 14–19].

Из-за высокой инерционности, медленного последовательного несинхронного опроса (около 3 с на один датчик в гирлянде) и ограниченной точности (максимальное цифровое 12-разрядное разрешение 0.0625 °C и погрешность без дополнительной индивидуальной градуировки до 0.5 °C) [20] используемые цифровые датчики *DS18B20* далеко не всегда удовлетворяют указанным требованиям. Часто эти недостатки компенсируют пространственно-временным осреднением и сглаживанием измеренного температурного поля, что приводит к потере высокочастотных составляющих в измерениях исследуемого процесса. При этом в системах мониторинга пространственного переноса водных масс и распространения внутренних волн приходится увеличивать пространственный базис (расстояние между гирляндами) на горизонте.

Изготовление термокос на базе аналоговых платиновых датчиков сопротивления [14–18] или цепочки термисторов [7, 17] с индивидуальными аналого-цифровыми преобразователями является трудоемким и относительно дорогостоящим процессом. Однако платиновые датчики характеризуются большей метрологической точностью измерений (0.01 °C [14] и ± 0.025 °C [17] соответственно) и высокой стабильностью.

В ряде случаев альтернативой могут быть распределенные термопрофилемеры [21, 22], которые изготавливаются на базе медных проводников, уложенных по ортогональным функциям непрерывно по всему профилю датчика. Разрешение каждого участка длиной от нескольких сантиметров до нескольких метров адаптируется под конкретную задачу. Уже на аппаратном уровне это позволяет получать непрерывный сглаженный профиль с восстановленной осредненной температурой на каждом участке измерения. Наглядное отображение динамики температурных изменений в виде изолиний в телеметрическом режиме ¹⁾ без дополнительной трехмерной интерполяции обеспечивает оперативное решение задач регистрации внутренних волн и определения их параметров. Система термопрофилемеров с идентичными метрологическими характеристиками (инерционностью и точностью) позволяет обеспечить более точное определение временного сдвига фаз температурных колебательных процессов (короткопериодных внутренних волн) и фронтов на меньшем пространственном базисе установки измерителей. Малогабаритность системы позволяет размещать ее на стационарных объектах (например, на океанографической платформе), избегая технических сложностей при установке и сопровождении

¹⁾ Программа для регистрации и обработки измерительных данных термопрофилемеров «THERMOPROF» / П. В. Гайский ; МГИ. Электрон. дан. Севастополь, 2022. № гос. регистрации 2022611315.

(поверхностное волнение, снос буев, автономное энергопитание и съем информации), отслеживать мелкомасштабные процессы в прибрежной зоне со сложной береговой линией, рельефом дна и с ограниченной пространственной локализацией.

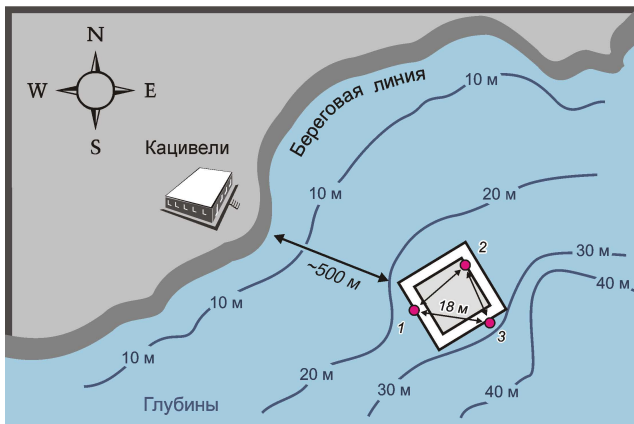
Целью работы является разработка и испытание малогабаритной стационарной автоматизированной системы на базе распределенных термопрофилемеров для определения пространственно-временных параметров распространения гидрологических процессов, сопровождающихся изменением температурных градиентов, в прибрежной акватории и анализ полученных результатов.

Аппаратура

В рамках разработки и испытания подобной малогабаритной системы в границах периметра океанографической платформы в п. Кацивели (Крым) были созданы и стационарно установлены распределенные термопрофилемеры [21–22]. Конструктивно термопрофилемеры представляют собой медные проводники, уложенные по ортогональным функциям по всей длине распределенного датчика. Количество проводников соответствует количеству участков. Осредненная температура на каждом участке профиля вычисляется с помощью матриц индивидуальных градуировочных коэффициентов, полученных при метрологической поверке. Защитная оболочка сенсорной части, выполненная снаружи в виде грузонесущей полиамидной трубки, изготавливалась с учетом требований одинаковой инерционности (теплоемкость) датчиков. Метрологические характеристики измерительных каналов с инструментальным разрешением $0.0026\text{ }^{\circ}\text{C}$ также были одинаковыми. В результате было создано три термопрофилемера длиной по 24 м с пространственно-распределенными участками длиной 1.5 м по 16 шт. в каждом.

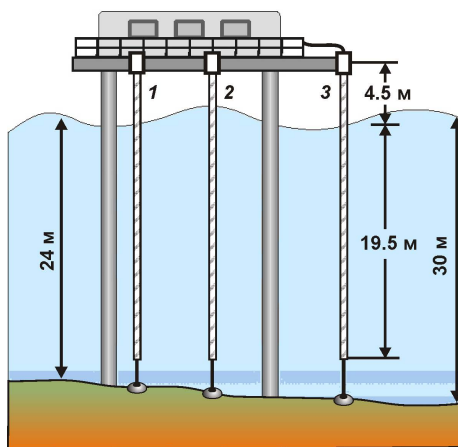
Следует отметить, что более ранние испытания термопрофилемеров с повышенным разрешением по профилю (с длиной участков по 20 см), проведенные на океанографической платформе, не продемонстрировали каких-либо значимых преимуществ при регистрации первичных параметров исследуемых внутренних волн. Инерционность измерителей в жидкости из-за защитной грузонесущей полиамидной оболочки-трубки составила около 30 с. Погрешность измерений осредненной на участке температуры метрологически определена как $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Период опроса всех 16 датчиков – участков профиля одного измерителя – составлял 0.5 с. Измерительные данные поступали одновременно со всех трех измерителей на бортовой компьютер с привязкой к единому таймеру и в телеметрическом режиме отображались в виде градиентного поля и изотерм.

Общая схема установки системы представлена на рис. 1. Поскольку рельеф дна в районе расположения платформы характеризуется увеличением глубины в юго-восточном направлении, то глубина закоривания распределенных датчиков менялась от 24 до 28 м (рис. 2). По данным более ранних региональных наблюдений [11–13, 21–22], наиболее подходящие условия для испытания системы соответствовали сезону сформировавшегося термоклина и проявления апвеллинга – даунвеллинга (с мая по август).



Р и с . 1 . Схема установки системы из трех термопрофилемеров у океанографической платформы. Красными кружками обозначены установленные датчики. Цифры 1–3 – номер профилемера

Fig . 1 . Location and layout of a system of three thermoprofilometers at the oceanographic platform. The red dots denote the installed thermoprofilometers (1–3)

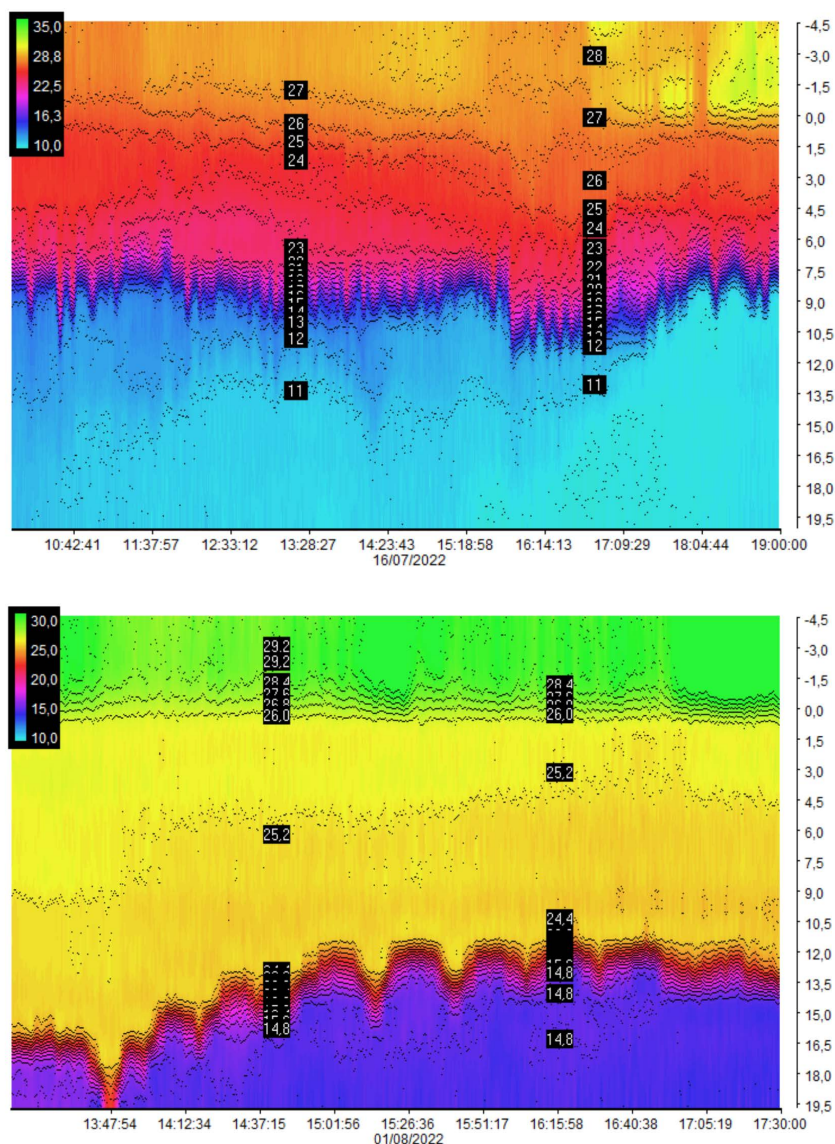


Р и с . 2 . Профиль глубин в месте установки системы и вертикальное расположение термопрофилемеров (1–3)

Fig . 2 . Depth profile at the installation site of the system and vertical placement of the thermoprofilometers (1–3)

В результате испытаний созданной системы из трех термопрофилемеров, проработавшей более года – с июня 2021 г. по август 2022 г., были проанализированы данные за два указанных сезонных периода. Почти все зарегистрированные значимые изменения заглубления выраженного термоклина сопровождалось волновыми процессами, отраженными в вертикальных профилях температуры. По наглядности (с выраженной периодичностью не менее пяти

последовательных гармоник) и возможности интерпретации за сезон можно было выделить около 10 проявлений короткопериодных внутренних волн длительностью от 1 до 4 ч. Средний период таких волн составлял 10–12 мин, а амплитуда – 2.5–3 м. Примеры отображения данных на экране монитора в процессе обработки программой в телеметрическом режиме измерений представлен на рис. 3.



Р и с . 3 . Примеры записи короткопериодных внутренних волн одним из термопрофилемеров системы

F i g . 3 . Examples of a record of short-period internal waves made by one of the thermoprofilometers

Результаты

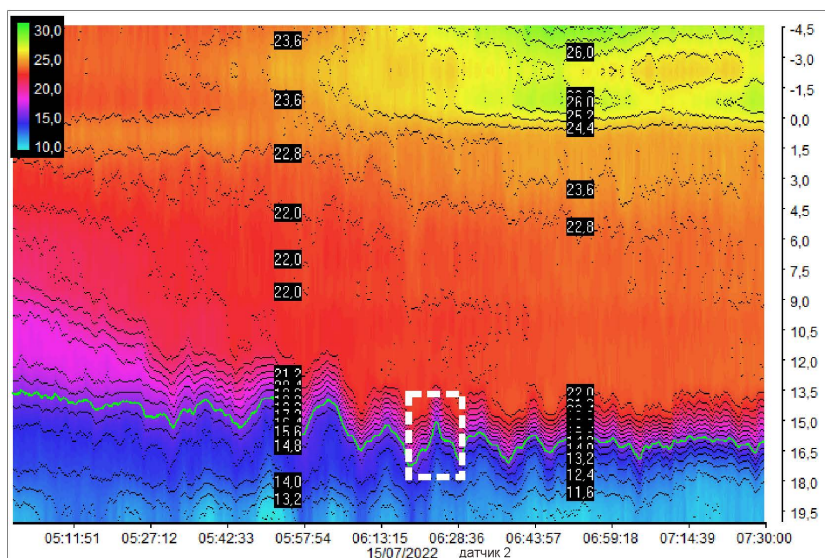
В качестве примеров работы системы приведены результаты расчетов параметров для наблюдаемых короткопериодных внутренних волн. При использовании данной системы определение направлений (горизонтальных и вертикальных) и скоростей смещения или распространения внутренних волн возможно только при наличии выраженных температурных фронтов, на основе которых мы можем коррелировать данные датчиков и рассчитывать временные задержки. Привязка к системе координат и географическому положению позволяет далее определить искомые динамические параметры наблюдаемого процесса.

В качестве данных для синхронной привязки использовались расчетные пространственно-временные смещения изотерм в пикноклине на профилях температуры, полученных каждым из термопрофилемеров. Расчет пространственных смещений изотерм реализован алгоритмически-программно для каждого распределенного датчика как в телеметрическом режиме, так и при постобработке²⁾. Алгоритмы вычисления направления и скорости смещения фронтов были реализованы программно с помощью тригонометрических формул с редактируемой привязкой к пространственной ориентации и расположению датчиков. Непосредственный расчет этих параметров в рамках проведенных испытаний системы осуществлялся в режиме операторного ввода первичных задержек между датчиками (в данном случае достаточно ввода t_{31} и t_{32} , см. рис. 4) для заданных геометрических параметров.

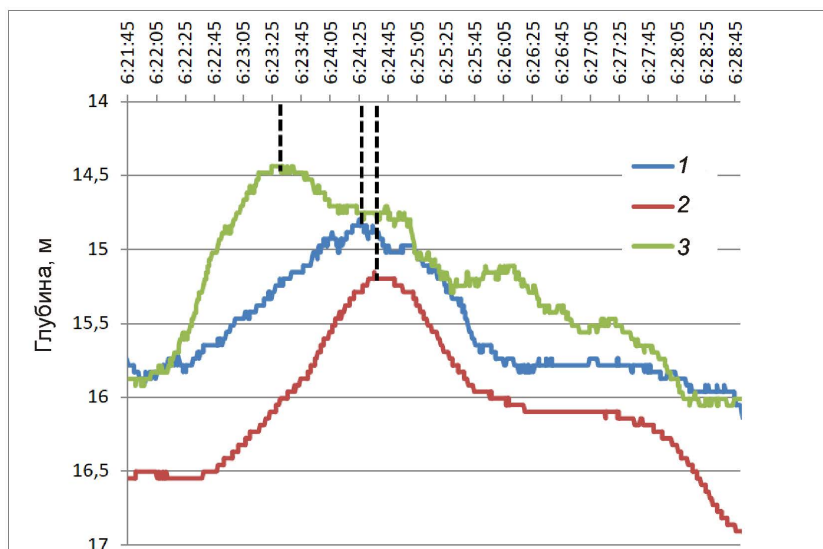
Р и с . 4 . Отображение на экране монитора результатов обработки данных системой: поле температуры с динамикой изотерм и градиентом профилей температур – a, d, g (белым прямоугольником (a, d) и стрелками (g) обозначена расчетная область); скоррелированные пространственные смещения выбранной изотермы в расчетной области на границе температурного фронта и внутренней волны для трех термопрофилемеров ($1, 2, 3$) – b, e, h, j (штриховые линии отмечают на графиках выбранные границы пространственного смещения изотермы во временном диапазоне для каждого датчика); результаты программного расчета динамических характеристик внутренних волн (c, f) по полученным временным задержкам (t_{31}, t_{32}, t_{12}) и скорости и направления смещения фронтов при апвеллинге (i) и даунвеллинге (k)

Fig. 4. Display of the results of data processing by the system on the monitor screen: temperature field with isotherm dynamics and temperature profile gradient – a, d, g (the white rectangle (a, d) and arrows (g) indicate the calculation area); correlated spatial displacements of the selected isotherm in the calculation area at the boundary of the temperature front and internal wave for three thermoprofilemeters ($1, 2, 3$) – b, e, h, j (the dashed lines mark on the graphs the selected boundaries of the isotherm spatial displacement in the time range for each sensor); results of program calculation of the dynamic characteristics of internal waves (c, f) based on the obtained time delays (t_{31}, t_{32}, t_{12}) and the speed and direction of front displacement during upwelling (i) and downwelling (k)

²⁾ Программа для регистрации и обработки измерительных данных термопрофилемеров «THERMOPROF» / П. В. Гайский ; МГИ. Электрон. дан. Севастополь, 2022. № гос. регистрации 2022611315.



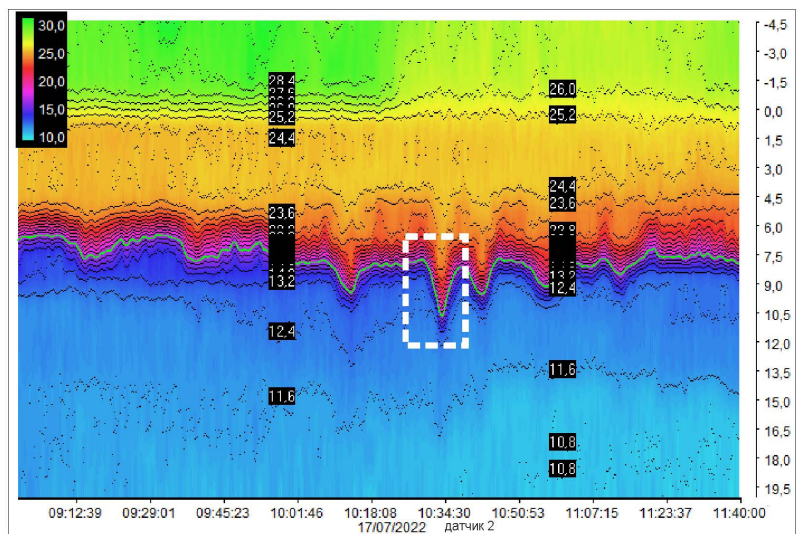
a



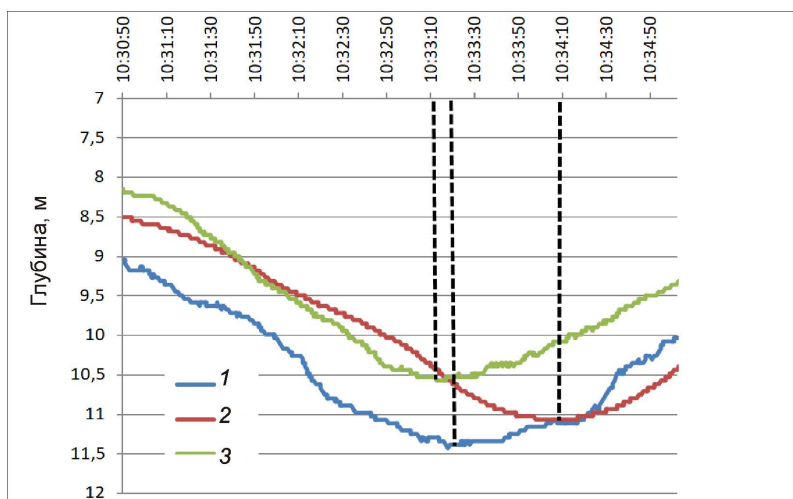
b



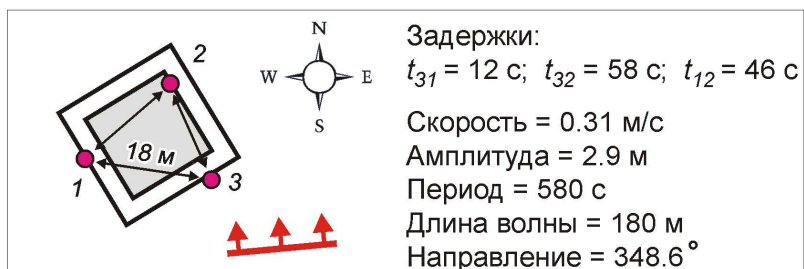
c



d



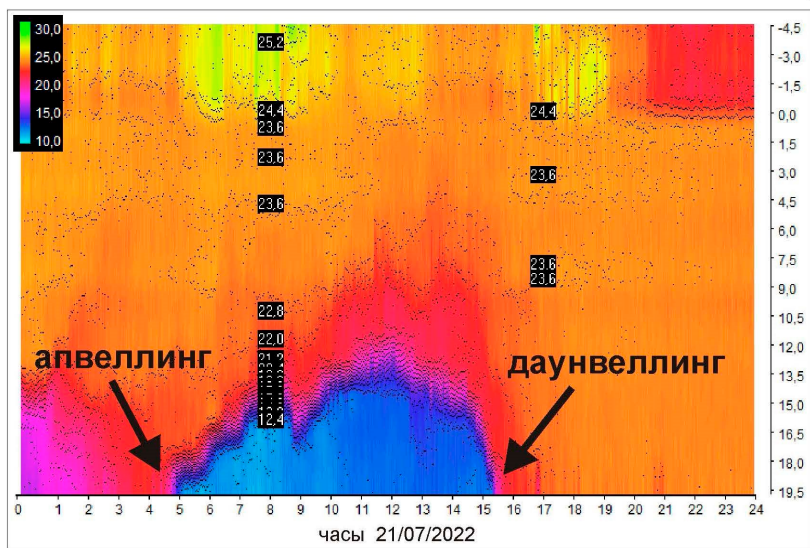
e



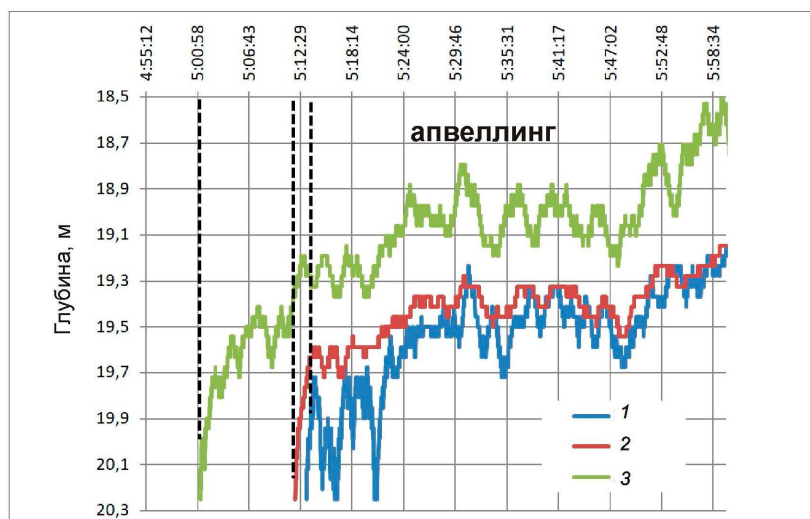
f

Рис. 4. Продолжение

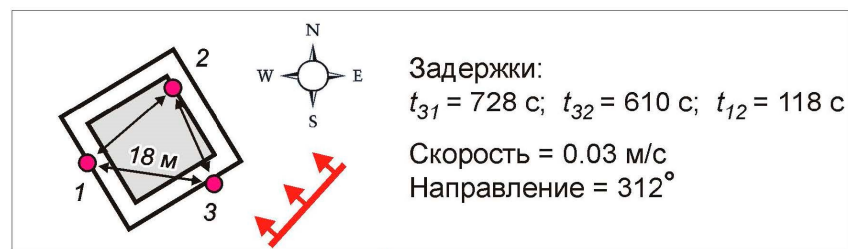
Fig. 4. Continued



g



h



i

Рис. 4. Продолжение

Fig. 4. Continued

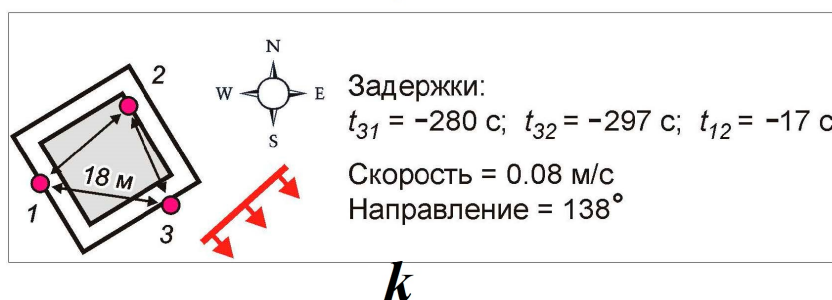
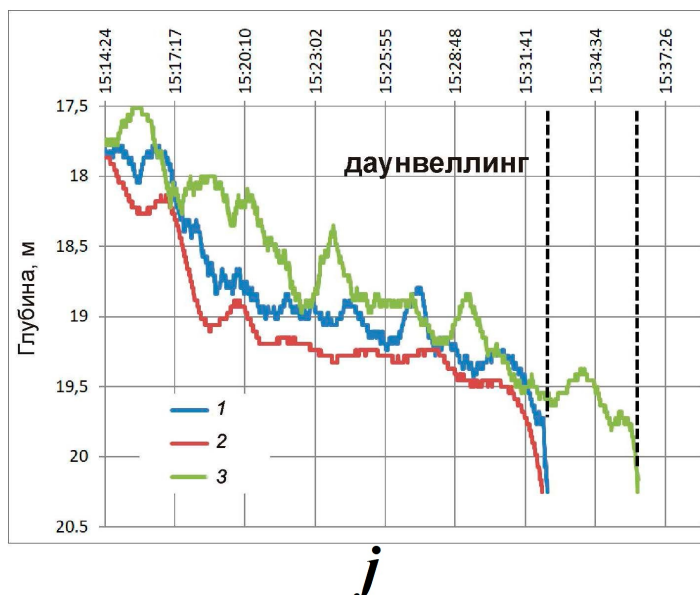


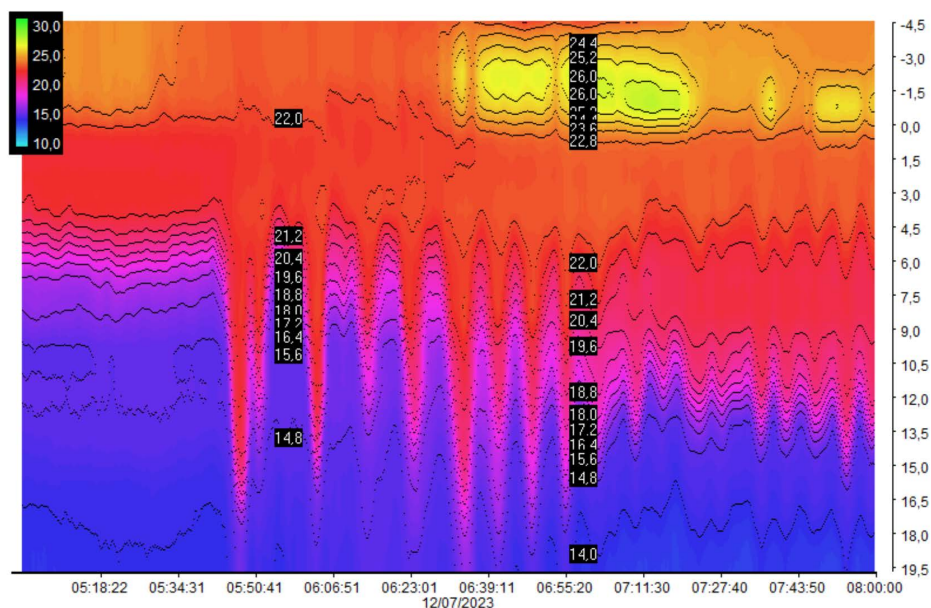
Рис. 4. Окончание

Fig. 4. End

Получение характеристик внутренних волн (амплитуды, периода, направления, скорости и длины волны) в автоматическом режиме затруднено рядом факторов, связанных с нестационарной периодичностью и сложностью автоматической выборки синхронизированных фронтов колебательного процесса в телеметрическом режиме. Поэтому на данный момент эта задача решается оператором при визуальной оценке событий на экране монитора либо при последующей обработке измерительной информации.

Примеры отображения на экране монитора результатов обработки представлены на рис. 4 (a – f) (параметры короткопериодных внутренних волн на границе термоклина). На рис. 4 (g – k) представлены расчеты для более масштабного во времени переноса глубинных холодных масс, для которого рассчитаны направление и горизонтальная скорость.

Следует отметить, что при турбулентности [23–25], которая может возникать из-за течений и близлежащих свайных несущих конструкций платформы, малая инерционность датчиков в системе отрицательно сказывается на сопоставлении коррелирующих колебательных процессов, связанных с прохождением внутренних волн.



Р и с . 5 . Пример регистрации интенсивных внутренних волн термопрофилемерами в районе океанографической платформы

Fig . 5 . Example of a record of intense internal waves with thermoprofilemeters near the oceanographic platform

В период испытаний системы из трех термопрофилемеров не наблюдалось проявления достаточно редких интенсивных внутренних волн, которые ранее фиксировались с помощью термопрофилемеров в районе платформы до трех раз в год и имели большую амплитуду (более 10 м), период около 12 мин и выраженный температурный фронт (см. рис. 5).

Заключение

Испытания разработанной системы на базе распределенных термопрофилемеров показали ее работоспособность в условиях выраженных температурных фронтов. Очевидно, что в среде более ламинарной (относительно пространственных границ установки системы) корреляция будет более четкой, что повысит достоверность автоматических программных расчетов. В условиях течений, изрезанности береговой зоны и неоднородности рельефа дна увеличение расстояния между датчиками системы может приводить к искажениям синхронности волновых процессов в измеряемых профилях температуры, а следовательно – к сложностям при их сопоставлении (корреляции). В этом случае установка подобной системы на стационарном объекте является предпочтительной с точки зрения стоимости и технического сопровождения, а также ввиду отсутствия таких факторов, как снос буев и влияние поверхностного волнения на пространственные координаты измерительной системы. Для малогабаритной системы может быть обеспечена ограниченная пространственная локализация в бухте или проливе.

Преимущества и недостатки использования всех применяемых типов датчиков для создания подобных систем определения параметров внутренних волн могут быть оценены не только по метрологической точности измерительных каналов, но и по долговременной стабильности, стоимости и удобству сопровождения (обслуживания). Окончательный вывод можно сделать после проведения совместных натурных испытаний на объектах мониторинга и интеркалибровки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Structure and generation of turbulence at interfaces strained by internal solitary waves propagating shoreward over the continental shelf / J. N. Moum [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. Vol. 33, iss. 10. P. 2093–2112. doi:10.1175/1520-0485(2003)033<2093:SAGOTA>2.0.CO;2
2. Внутренние волны и перемешивание в шельфовой зоне моря / В. В. Навроцкий [и др.] // *Известия ТИНРО*. 2010. Т. 162. С. 324–337. EDN NDOQWB.
3. Интенсивные внутренние волны аномальных высот на шельфе Черного моря / В. Г. Бондур [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 1. С. 114–127. EDN EMZTKT. doi:10.31857/S0002-3515551114-127.
4. Трансформация и эффекты внутренних волн в прибрежной зоне моря / В. В. Навроцкий // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 2. С. 230–245. EDN UKPLFG. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).14
5. Моделирование динамики интенсивных внутренних волн на шельфе / Т. Г. Талипова [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 6. С. 714–722. EDN SYYMR. doi:10.7868/S0002351514060169
6. *Сабинин К. Д., Серебряный А. Н.* «Горячие точки» в поле внутренних волн в океане // *Акустический журнал*. 2007. Т. 53, № 3. С. 410–436. EDN HFFSOU.
7. A fast and accurate thermistor string / H. van Haren [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2001. Vol. 18, iss. 2. P. 256–265. doi:10.1175/1520-0426(2001)018%3C0256:AFAATS%3E2.0.CO;2
8. High sampling rate thermistor string observations at the slope of Great Meteor Seamount / H. van Haren [et al.] // *Ocean Science*. 2005. Vol. 1, iss. 1. P. 17–28. doi:10.5194/os-1-17-2005
9. Generation and evolution of mode-two internal waves in the South China Sea / A. K. Liu [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2013. Vol. 59. P. 18–27. doi:10.1016/j.csr.2013.02.009
10. Внутренние волны на шельфе Черного моря в районе Гераклеийского полуострова: моделирование и наблюдение / В. А. Иванов [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 4. С. 322–340. EDN SOBBLG. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-322-340
11. *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. EDN RPEHKB.
12. *Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев С. В.* Анализ результатов натурных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах мирового океана // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 5. С. 9–32. EDN TECAWR.

13. Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев С. В. Результаты долговременного мониторинга вертикальной термической структуры шельфовых вод на Черноморском гидрофизическом полигоне РАН // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 75–87. EDN JOHOWF. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-75-87
14. 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
15. 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. Калининград, 26–31 августа 2018 года / Под редакцией В. А. Гриценко. Калининград : БФУ им. И. Канта, 2018. С. 12–16. EDN YYTGOT.
16. 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
17. 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
18. 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.
19. Silvestrova K., Myslenkov S., Puzina O., Mizyuk A., Bykhalova O. Water structure in the Utrish Nature Reserve (Black Sea) during 2020–2021 according to thermistor chain data // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, iss. 4. 887. doi:10.3390/jmse11040887
20. Исследование долговременной стабильности параметров термодатчиков DS18B20 / Л. И. Сучкова [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 1. С. 42–46. EDN TVUDXX.
21. Гайский В. А., Гайский П. В. Распределенные термопрофилемеры и их возможности в океанографических исследованиях // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 6. С. 46–76.
22. Гайский В. А., Гайский П. В. Использование распределенных датчиков для температурных измерений в море. Севастополь : ИПТС, 2018. 222 с. doi:10.33075/978-5-6040795-4-6
23. Слепышев А. А., Алиева А. Н., Лактионова Н. В. Нелинейные эффекты при распространении внутренних волн при наличии турбулентности // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 2. С. 13–23. EDN TMJWTX.
24. Вертикальный турбулентный обмен в Черном море: экспериментальные исследования и моделирование / А. С. Самодуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 6. С. 735–759. EDN LCDZNK.
25. Билюнас М. В., Доценко С. Ф. Свободные внутренние волны в неоднородном течении с вертикальным сдвигом скорости // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 1. С. 3–16. EDN LOGRSD.

Поступила 29.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 11.12.2023 г.; принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторе:

Гайский Павел Витальевич, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией инновационного морского приборостроения, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3110-848X**, **ResearcherID: HQZ-3112-2023**, **Scopus Author ID: 7801588003**, **SPIN-код: 7789-0658**, *gaysky@inbox.ru*

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.