

Результаты долговременного мониторинга вертикальной термической структуры шельфовых вод на Черноморском гидрофизическом полигоне РАН

А. П. Толстошеев*, С. В. Мотыжев, Е. Г. Лунев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: tolstosheev@marlin-yug.com*

Поступила в редакцию 10.10.2019 г.

Цель. Географические и климатические особенности прибрежной зоны Южного берега Крыма определяют большую динамическую активность термической структуры вод. Исследования вертикальной изменчивости температуры при отсутствии доминирующего влияния приливов позволяют уточнить структуру и динамику апвеллингов, а также характеристики волн различного происхождения. Обнаружить и зарегистрировать такие труднопрогнозируемые процессы, временные масштабы которых составляют от нескольких минут до нескольких суток, возможно только путем длительных непрерывных наблюдений. Цель данной работы – анализ результатов долговременного мониторинга термических процессов на гидрофизическом полигоне в прибрежной зоне Южного берега Крыма.

Методы и результаты. В декабре 2012 г. на стационарной платформе, расположенной в прибрежной зоне Черного моря в акватории Голубого залива на расстоянии ~450 м от берега, была установлена телеметрическая система оперативного контроля вертикального распределения температуры воды. Глубина в месте установки ~30 м. В термопрофилирующей линии системы использовались датчики температуры с погрешностью не более 0,1 °С. Среднее расстояние между датчиками – 1,5 м. Период профилирования – 60 с. В течение 6,5 лет эксперимента с системой контроля были получены статистически значимые, уникальные по продолжительности ряды данных об изменчивости термических процессов в прибрежном районе моря. К началу апреля 2019 г. общее время продуктивной работы системы составило ~900 сут, было получено более 1300000 профилей температуры. Приводятся оценки сезонного цикла синоптической термической изменчивости по данным 2013 г. Рассматриваются реализации апвеллингов, не связанных с ветровым воздействием.

Выводы. Полученные в многолетнем эксперименте долговременные ряды данных позволяют не только уточнить, но и изменить некоторые из существующих представлений об особенностях эволюции термических процессов в шельфовой зоне Черного моря. Отмечается целесообразность использования системы наблюдений в качестве сегмента постоянно действующей сети прибрежных полигонов гидрофизических измерений в Черном море.

Ключевые слова: прибрежный район, Черное море, термические процессы, вертикальное распределение температуры, термолиния, апвеллинг.

Благодарности: авторы выражают свою признательность рецензентам за ценные замечания и методическую помощь. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» при финансовой и технической поддержке ООО «Марлин-Юг».

Для цитирования: Толстошеев А. П., Мотыжев С. В., Лунев Е. Г. Результаты долговременного мониторинга вертикальной термической структуры шельфовых вод на Черноморском гидрофизическом полигоне РАН // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 75–87. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-75-87

Results of Long-Term Monitoring of the Shelf Water Vertical Thermal Structure at the Black Sea Hydrophysical Polygon of RAS

A. P. Tolstosheev*, S. V. Motyzhev, E. G. Lunev

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

**e-mail: tolstosheev@marlin-yug.com*

Purpose. The geographical and climatic features of the Crimean Southern coast condition significant dynamic activity of the water thermal structure. Studies of the temperature vertical variability in the absence of the tides' dominant affect, permit to specify the upwelling structure and dynamics as well as the characteristics of waves of various origin. Such hardly-forecasted processes, the time scales of which constitute from a few minutes to several days can be revealed and registered only by long-term continuous observations. The aim of the study is to analyze the results of long-term monitoring of the thermal processes in the coastal zone near the Crimean Southern coast. It was performed at the Black Sea hydrophysical scientific polygon.

Methods and Results. In December, 2012 the observation system for operational control of the water temperature vertical distribution was installed at the stationary platform located in the coastal zone of the Black Sea (the Blue Bay) at a distance of ~450 m from the coast. The sea depth under the platform was ~30 m. Digital temperature sensors having precision better than 0.1 °C were installed with 1.5 m intervals in the temperature string of the system. The profiling period was 60 s. The 6.5 year-long experiment with the observation system provided statistically significant and duration-unique serious of data on variability of the thermal processes in the sea coastal region. By early April 2019, total duration of the system productive functioning was ~900 days. In course of this period, more than 1300000 temperature profiles were obtained. Based on the data obtained in 2013, the estimates of a seasonal cycle of the temperature synoptic variability are represented. The upwelling events not related to the wind impact are considered.

Conclusions. The long-term data series resulted from the multi-year experiment permit not only to specify, but also to change some of the existing ideas of the thermal processes' evolution features in the shelf zone of the Black Sea. Noted is the expediency of applying the observation system as a segment of the constantly operating network at the coastal polygons for performing hydrophysical measurements in the Black Sea.

Keywords: coastal area, the Black Sea, thermal process, temperature vertical distribution, temperature string, upwelling.

Acknowledgments: the authors are grateful to the reviewers for their valuable remarks and methodical aid. The study is carried out within the framework of the state task on theme "Development of the methods of operational oceanology based on the inter-disciplinary studies of the marine environment formation and evolution processes, and mathematical modeling using the data of remote and direct measurements" at financial and technical support of Marlin-Yug LTD.

For citation: Tolstosheev, A.P., Motyzhev, S.V. and Lunev, E.G., 2020. Results of Long-Term Monitoring of the Shelf Water Vertical Thermal Structure at the Black Sea Hydrophysical Polygon of RAS. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(1), pp. 69-80. doi:10.22449/1573-160X-2020-1-69-80

Введение. Вертикальная термическая структура вод – один из наиболее информативных параметров при мониторинге процессов и явлений, которые определяют структуру и динамику биогеохимических компонентов морской среды, состояние и изменчивость береговой зоны, ее рекреационную привлекательность. В данной статье представлены некоторые результаты эксперимента по исследованию термических процессов в прибрежном районе Черного моря. В 2012 г. на океанографической платформе Черноморского гидрофизического полигона, расположенного в акватории Южного берега Крыма, была установлена автономная телеметрическая система оперативного кон-

роля вертикального распределения температуры воды. Представительные ряды вертикальных профилей температуры, полученные к началу 2019 г., позволяют восстановить динамику прибрежных вод в диапазонах изменчивости от мелкомасштабной до синоптической. В ходе эксперимента зарегистрированы многочисленные реализации апвеллингов и различных типов внутренних волн. Исследованию внутренних волн посвящена обширная библиография [1–8], однако порождающие их механизмы, особенности развития и диссипации остаются слабо изученными. Внутренние волны – трудно прогнозируемые и относительно кратковременные процессы, обнаружить и зарегистрировать которые возможно только путем систематических долговременных наблюдений. Данные эксперимента позволяют детально проследить трансформацию вертикальных профилей температуры воды, связанную с распространением одиночных и волновых боров, внутренних солитонов. Один из его значимых результатов состоит в том, что, в отличие от проводившихся ранее исследований, в эксперименте получены данные о термической изменчивости прибрежных вод в рассматриваемом районе не только в теплое время года, но и в осенне-зимние и зимне-весенние периоды.

Система сбора и передачи данных. С целью установления систематического оперативного мониторинга термических процессов в прибрежных районах моря в Морском гидрофизическом институте (МГИ) была разработана автономная телеметрическая система оперативного контроля распределения температуры воды. Термопрофилирующая линия (термолиния) системы реализована на основе сетевого интерфейса *MicroLAN*¹. Интерфейс поддерживает протокол обмена и обеспечивает электропитание всех датчиков термолинии по одной шине типа «витая пара». В качестве датчиков температуры использованы интегральные цифровые термометры типа *DS18B20*² (*Dallas Semiconductor*). При индивидуальной градуировке термометров их погрешность в диапазоне от –2 до +35 °С не превышает 0,1 °С. Диаметр термолинии – не более 13 мм. На нижнем заякоренном конце термолинии размещен модуль измерителя гидростатического давления на основе пьезорезистивного преобразователя типа *MS5535-30C*³ (*Measurement Specialties*). Результаты измерений поступают на бортовой модуль и по радиоканалу в режиме реального времени транслируются на береговую приемную станцию. Каждое сообщение содержит также данные об атмосферном давлении, канал измерения которого на основе пьезорезистивного преобразователя типа *MS5534C*⁴ (*Measurement Specialties*) расположен в бортовом модуле. Интервал между измерениями всех параметров – 60 с.

¹ URL: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/155> (дата обращения: 20.08.2019).

² URL: <https://www.maximintegrated.com/en/products/sensors/DS18B20.html> (дата обращения: 20.08.2019).

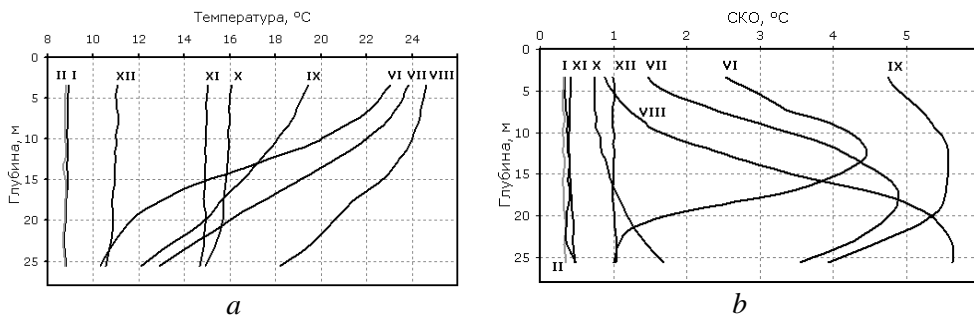
³ URL: <https://www.amsys.de/downloads/data/MS5535-30C-AMSYS-datasheet.pdf> (дата обращения: 20.08.2019).

⁴ URL: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FMS5534C%7FB%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_MS5534C_B.pdf%7FCAT-BLPS0032 (дата обращения: 20.08.2019).

В конце декабря 2012 г. система контроля была установлена на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического полигона. Платформа расположена на южном побережье Крыма в акватории Голубого залива на расстоянии ~450 м от берега в точке с координатами 44° 23' 38" с. ш., 33° 59' 15" в. д. Первоначально термолиния с 17 датчиками температуры была расположена с западной стороны платформы (глубина составляла ~24 м) и проработала до конца октября 2014 г. В августе 2015 г. новая термолиния с 19 датчиками температуры была установлена с южной (мористой) стороны платформы. Глубина в месте постановки ~29,5 м.

Подобные наблюдения на черноморском шельфе Российской Федерации выполнялись и ранее. В статьях [9–12] приводятся результаты исследований, полученные на платформе Черноморского гидрофизического полигона, в работах [13–15] – на заякоренной буйковой станции в прибрежной зоне геленджикского района моря. Наблюдения проводились главным образом в летне-осенний период, а их продолжительность ограничивалась несколькими сутками. В течение 6,5 лет эксперимента с системой контроля были получены статистически значимые, уникальные по продолжительности ряды данных об изменчивости термических процессов в прибрежном районе моря. По состоянию на начало апреля 2019 г. общее время продуктивной работы системы составило почти 900 сут. За это время было получено более 1300000 профилей температуры. Наиболее представительные ряды данных были получены в следующие периоды: январь – февраль 2013 г., конец июня 2013 г. – январь 2014 г., сентябрь 2015 г. – середина марта 2016 г., конец июня 2017 г. – начало апреля 2018 г., октябрь 2018 г. – февраль 2019 г. Перерывы в работе были связаны главным образом с нарушением герметичности или обрывом термолинии из-за сложных гидрометеорологических условий в районе проведения эксперимента. Система контроля обеспечивает оперативную доставку данных пользователям и может рассматриваться как наблюдательная компонента единой системы мониторинга шельфово-склоновой зоны Черного моря [13]. Совместный анализ результатов эксперимента и спутниковых данных позволит повысить достоверность результатов дистанционного мониторинга прибрежных зон.

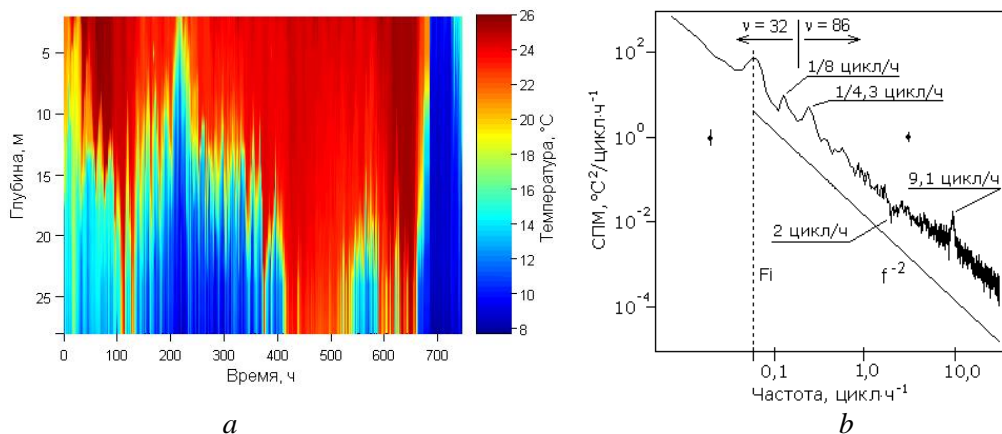
Результаты наблюдений сезонной термической изменчивости. В качестве оценок сезонного цикла термической изменчивости принимались осредненные ежемесячные значения температуры, интерполированные по глубине с шагом 1 м. Как видно из графиков на рис. 1, *a*, построенных по данным 2013 г., в летние месяцы слой с наибольшей изменчивостью температуры ожидаемо заглублялся от горизонта 12 м в июне до придонного слоя в августе. Наиболее интенсивные флуктуации со средним квадратическим отклонением (СКО) 5,5 °С наблюдались в сентябре в широком слое на глубине от 10 до 18 м (рис. 1, *b*). Средние глубины явно выраженного в июне и июле термоклина составляли 12 и 17 м соответственно. Полученные результаты не противоречат представлениям о трансформации среднемесячных вертикальных профилей температуры и позволяют уточнить особенности сезонной эволюции термических процессов на южнобережном шельфе Черного моря.



Р и с. 1. Среднемесячные вертикальные профили температуры (а) и ежемесячные СКО (b) по данным мониторинга 2013 г. Римскими цифрами обозначены месяцы года

F i g. 1. Monthly average temperature vertical profiles (a) and monthly root-mean square deviations (b) based on the monitoring in 2013. Roman numbers denote the months

Частотная структура флуктуаций температуры оценивалась по спектральным плотностям мощности (СПМ), которые рассчитывались по методу усреднения модифицированных периодограмм. На рис. 2 показаны распределение температуры (рис. 2, а) и СПМ температуры в июле 2017 г. на глубине 20 м (рис. 2, b).



Р и с. 2. Распределение температуры (а) и СПМ температуры на глубине 20 м (b) по данным наблюдений в июле 2017 г. (f^{-2} – канонический спектр внутренних волн; F_i – частота инерционных колебаний на широте платформы; 0 ч соответствует 00:00 01 июля 2017 г.)

F i g. 2. Temperature distribution (a) and density at the 20 m depth (b) based on the observation data in July, 2017 (f^{-2} is the canonical spectrum of internal waves; F_i is the frequency of inertial oscillations on the platform latitude; 0 hr corresponds to 00:00 on July 1, 2017)

СПМ рассчитывалась при разных степенях свободы ν : для разрешения низкочастотных мезомасштабных неоднородностей $\nu = 32$, высокочастотных – $\nu = 86$. На рис. 2, b указаны частоты колебаний, соответствующие статистически значимым максимумам энергии. СПМ в низкочастотной области содержит три таких максимума. Максимум с частотой F_i , равной 1/17,07 цикл/ч, обусловлен инерционными колебаниями, период которых на широте платформы составляет 17,15 ч. В высокочастотной области прослеживаются локальные минимум СПМ в окрестностях частоты 2 цикл/ч и мак-

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 36 № 1 2020 79

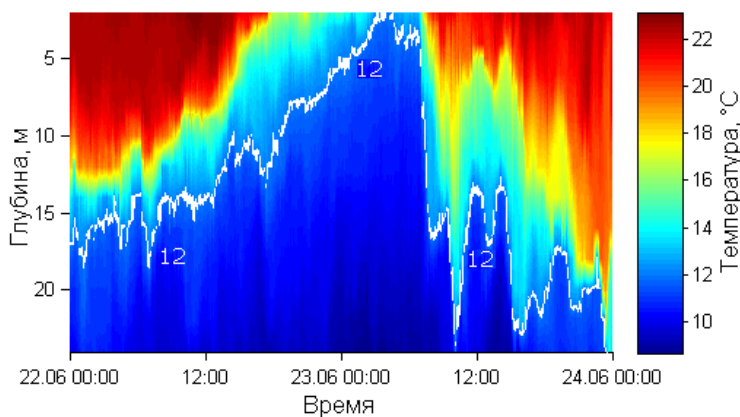
симум на частоте 9,1 цикл/ч. Наклон спектра вплоть до частоты 2 цикл/ч хорошо совпадает с каноническим спектром внутренних волн. Средняя частота плавучести оценивалась по соотношению между градиентом плотности и температурой [16] и на глубине 20 м составила ~18 цикл/ч. Полученные результаты отличаются от данных статьи [12] более широким спектральным составом в низкочастотной области, поскольку основаны на данных долговременных наблюдений.

Результаты наблюдений термической изменчивости на различных стадиях эволюции прибрежных динамических процессов. В процессе многолетнего эксперимента получены представительные данные наблюдений термической изменчивости водной среды на различных стадиях эволюции прибрежных динамических процессов, главным образом апвеллингов. Несмотря на устойчивый научный и практический интерес к такого рода явлениям, природа их остается до конца не выясненной. Во всяком случае, предложенное в монографии [10] деление прибрежных черноморских апвеллингов на два вида, экмановский и сгонный, образующиеся соответственно под действием вдольберегового ветра и ветра с берега, представляется недостаточно полным. Анализ результатов многолетних наблюдений на южном берегу Черного моря показывает, что не всегда существует причинно-следственная связь между параметрами ветра и апвеллингом. Как отмечается в работе [13], в таких радикальных короткопериодных перестройках гидрологической структуры, как, в частности, апвеллинг, не вполне известна роль, которую играют ветер и течения. Статьи [13, 14], в которых анализируются результаты комплексных экспериментов в северо-восточной части Черного моря, являются, на наш взгляд, наиболее значимыми публикациями, посвященными выяснению этой роли. Анализ гидрометеорологических условий на различных стадиях развития апвеллингов позволил авторам подтвердить существующую теорию их ветровой природы. Наряду с этим в статьях приведены результаты наблюдений, которые в эту теорию не вписываются. Решению проблемы может способствовать привлечение для анализа результатов систематических долговременных наблюдений на Черноморском гидрофизическом полигоне. Некоторые из этих результатов рассматриваются ниже.

При описании апвеллингов мы использовали следующие понятия, заимствованные из монографии [10]: фаза развития апвеллинга – интервал между временем начала понижения температуры поверхностного слоя и временем достижения температурой поверхностного слоя наименьшего значения; интенсивность – разность температур поверхностного слоя в начале и конце фазы развития; скорость изменения температуры поверхностного слоя в период развития; продолжительность апвеллинга – интервал между временем начала понижения температуры поверхностного слоя и временем достижения температурой поверхностного слоя наибольшего значения. Данные о характеристиках ветра доступны на интернет-сайте http://dvs.net.ru/mp/data/main_ru.shtml#model МГИ РАН.

Перед полным апвеллингом 22–23 июня 2013 г. (рис. 3) наблюдались устойчивый северо-западный ветер 4–6 м/с и двухслойная гидрологическая структура с глубиной термоклина 10–13 м. Апвеллинг начал развиваться око-

ло 07:00 22 июня с понижения температуры в слое ниже 8 м. Через 6 ч стала заметно снижаться температура приповерхностного слоя. С 13:15 22 июня до 03:20 23 июня температура на глубине 2 м изменилась с 22,9 до 11,9 °С. Средняя скорость развития апвеллинга составила $\sim 0,8$ °С/ч, а его интенсивность – 11 °С. Наибольший вертикальный градиент в фазе развития был зафиксирован 22 июня в 15:54 на глубине 4 м и составил 5,1 °С/м. Относительно устойчивая фаза апвеллинга продолжалась $\sim 2,5$ ч. Начиная с 06:40 23 июня температура начала повышаться. В течение 1 ч 40 мин температура поверхностного слоя изменилась с 12,4 до 21,7 °С. Скорость изменения температуры составила $\sim 5,8$ °С/ч. Измерения профиля температуры с интервалом 1 мин позволили детализировать процесс прогрева. Релаксация апвеллинга была обусловлена вторжением потока теплых водных масс с крутым фронтом, локализованным в верхнем слое до глубины ~ 12 м. В течение 2 мин, с 07:06 до 07:08, температура на глубине 5 м фронтальной зоны изменилась с 12,1 до 14,9 °С ($\sim 1,4$ °С/мин). К 08:15 23 июня температура на глубине 2 м достигла 21,7 °С и апвеллинг закончился. Его продолжительность составила ~ 25 ч. Приблизительно через 1,5 сут после окончания апвеллинга в исследуемом районе сформировалась устойчивая двухслойная термическая стратификация вод с толщиной верхнего квазиперемешанного слоя 9 м и градиентом температуры в термоклине 10,7 °С/м.

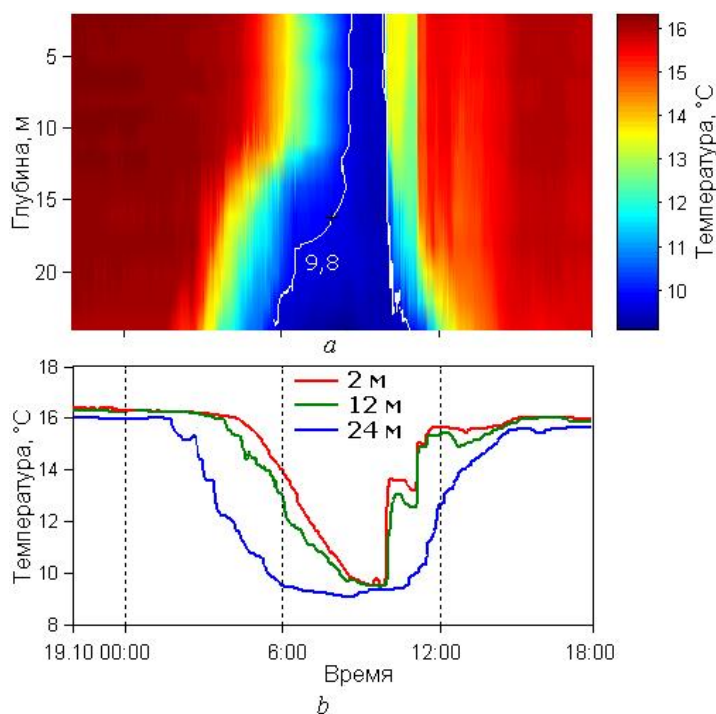


Р и с. 3. Распределение температуры и изотерма 12 °С (линия белого цвета) в полном апвеллинге 22–23 июня 2013 г.

F i g. 3. Temperature distribution and isotherm 12 °С (white line) in the full upwelling on June 22–23, 2013

Перед началом полного апвеллинга 19 октября 2013 г. наблюдались квазиизотермическая по всей глубине гидрологическая структура с температурой ($16 \pm 0,2$) °С и слабый южный ветер. Распределение температуры в различных фазах апвеллинга показано на рис. 4, а. Непосредственно перед апвеллингом ветер усилился до 12 м/с, а его направление изменилось на северное. Развитие апвеллинга началось в 01:48 19 октября с придонных слоев. С фазовыми задержками, приблизительно одинаковыми для всех горизонтов наблюдения, к 03:00 фронт холодной воды достиг верхнего слоя. К 09:30 температура на всех горизонтах снизилась до минимальных значений

($9,4 \pm 0,1$) °C. Установившийся низкотемпературный режим наблюдался в течение 30 мин. В процессе формирования переднего фронта апвеллинга наибольший температурный градиент наблюдался на горизонте 12 м и составил ~ 3 °C/ч. В 10 ч в слое от 12 м до поверхности началось резкое повышение температуры (рис. 4, *b*). При этом параметры ветра существенно не менялись. Релаксация апвеллинга проходила с высокой скоростью. В течение 3 мин, с 10:05 до 10:08, температура на горизонте 5 м изменилась с 9,8 до 13,4 °C (~ 3 °C/мин). Процесс формирования заднего фронта апвеллинга хорошо прослеживается по поведению изотермы 9,8 °C (рис. 4, *a*), которая в течение 50 мин сместилась из приповерхностного в придонный слой.

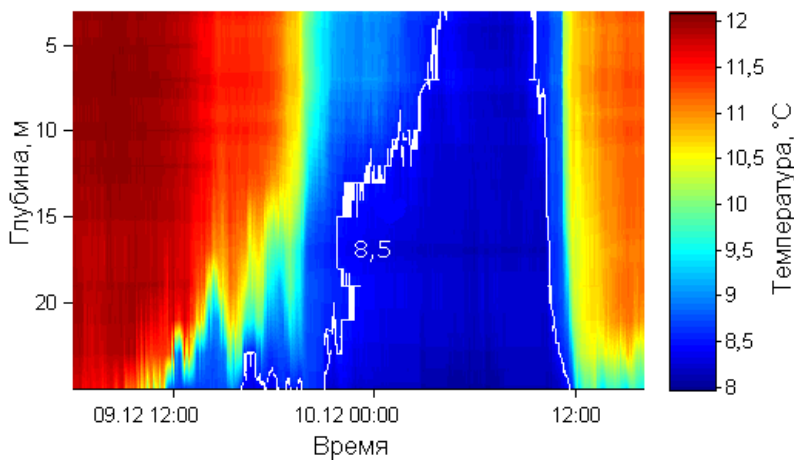


Р и с. 4. Распределение температуры и изотерма 9,8 °C (линия белого цвета) в полном апвеллинге 19 октября 2013 г. (*a*); временные ряды температуры на горизонтах 2, 12 и 24 м (*b*)

F i g. 4. Temperature distribution and isotherm 9.8 °C (white line) in the full upwelling on October 19, 2013 (*a*); temperature time series on horizons 2, 12 and 24 m (*b*)

Так же как и в предыдущем случае, перед полным апвеллингом 9–10 декабря 2013 г. (рис. 5) наблюдались квазиизотермическая по всей глубине гидрологическая структура с температурой ($11,8 \pm 0,2$) °C и северо-западный ветер, скорость которого не превышала 6 м/с. Утром 9 декабря направление ветра изменилось на юго-западное, его скорость достигала 12 м/с, и с 06:30 в придонные слои начали поступать холодные воды. В 09:00 при температуре поверхностного слоя 12,1 °C началась фаза развития полного апвеллинга, в конце которой в 05:30 10 декабря температура поверхностного слоя понизилась до 8,3 °C. Относительно устойчивая фаза продолжалась $\sim 3,5$ ч. Около 09:00 10 декабря с относительно медленным повышением температуры на

горизонтах выше 10 м началась релаксация апвеллинга. В 11:09 скорость релаксации резко увеличилась: в течение 3 мин температура слоя выше 5 м выросла на ~ 1 °С. Апвеллинг закончился к 13:00, его продолжительность составила ~ 28 ч. После окончания фазы развития апвеллинга и до его полной релаксации наблюдался устойчивый со скоростью до 10 м/с северный ветер.

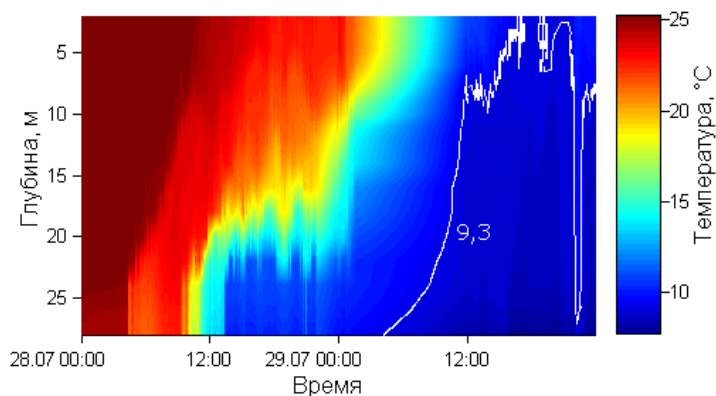


Р и с. 5. Распределение температуры и изотерма 8,5 °С (линия белого цвета) в полном апвеллинге 9–10 декабря 2013 г.

F i g. 5. Temperature distribution and isotherm 8.5 °C (white line) in the full upwelling on December 9–10, 2013

Перед полным апвеллингом 28 июля – 06 августа 2017 г. и в процессе его развития наблюдался слабый ветер переменных направлений. На рис. 6 показано распределение температур перед апвеллингом и в фазе его развития. Апвеллингу предшествовал даунвеллинг с температурами ($25 \pm 0,3$) °С. Непосредственно перед апвеллингом в придонный слой начали поступать кластеры низкотемпературных вод. Фронты кластеров хорошо видны на рис. 6. Фаза развития апвеллинга началась 28 июля в 10:20 и завершилась 29 июля в 20:50. В этот период наблюдалось усиление юго-западного ветра, скорость которого достигала 12 м/с, а температура в приповерхностном слое снизилась с 25,2 до 9,2 °С. Средняя скорость изменения температуры составила $\sim 0,5$ °С/ч, а интенсивность апвеллинга – 16 °С. Наибольший вертикальный градиент в фазе развития был зафиксирован 28 июля в 11:41 на глубине 21 м и составил 3,4 °С/м.

Релаксация апвеллинга началась в 02:00 31 июля с повышения температуры в верхнем слое моря. В первой половине суток 2 августа подул сильный, со скоростью до 12 м/с, северо-восточный ветер, вызвавший дрейфовый перенос и, как следствие, резкое повышение температуры воды в придонном слое. К 11:00 5 августа температура поверхностного слоя достигла 25 °С и апвеллинг закончился. Его продолжительность составила ~ 8 сут.

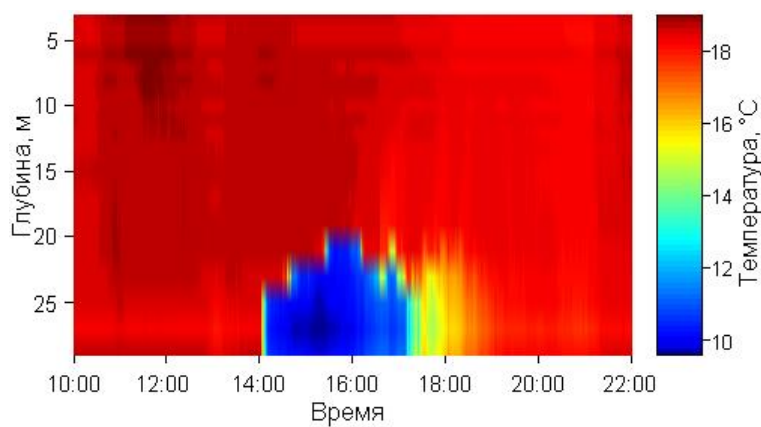


Р и с. 6. Распределение температуры и изотерма 9,3 °С (линия белого цвета) в фазе развития апвеллинга 28 июля – 06 августа 2017 г.

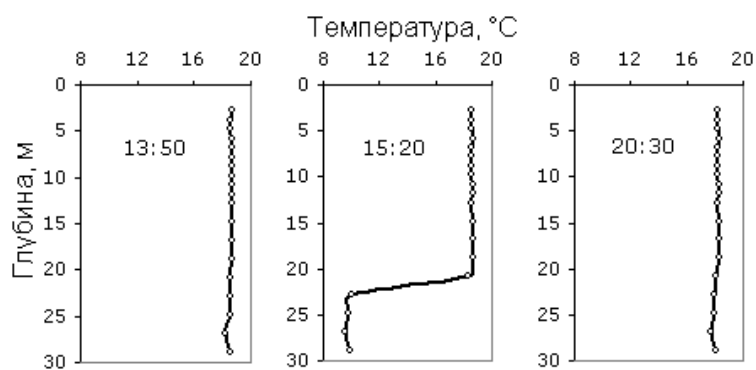
F i g. 6. Temperature distribution and isotherm 9.3 °С (white line) during the phase of upwelling development on July 28 – August 06, 2017

В процессе эксперимента также наблюдались многочисленные реализации нелинейных внутренних волн – одиночных и волновых боров, внутренних солитонов. Описания таких процессов в литературе встречаются относительно редко, поскольку для исследования их динамики требуется проведение систематических долговременных измерений с высоким временным разрешением [17]. В районе проведения эксперимента боры наблюдались и ранее, однако эти наблюдения малочисленны и выполнялись главным образом в летние периоды [1, 6]. В рассматриваемом эксперименте долговременные наблюдения позволили зарегистрировать десятки реализаций боров в различные сезоны года. На рис. 7 показан пример придонного одиночного бора, зарегистрированного 18 октября 2014 г. Перед началом бора наблюдались квазиизотермическая вертикальная структура вод (рис. 7, *b*) и слабый ветер. В первой половине дня 18 октября резко усилился северный ветер, скорость которого достигала 15 м/с. В течение 1 ч температура в придонном слое снизилась с 18,6 до 9,9 °С. Сформировавшийся придонный термоклин (рис. 7, *c*) сохранялся на протяжении 3 ч, после чего началось ослабление стратификации. К 20:30 (рис. 7, *d*) восстановились гидрометеорологические условия, предшествовавшие бору.

Как уже упоминалось, в работах, посвященных анализу термических процессов на шельфе Южного берега Крыма, использовались преимущественно результаты наблюдений в летние сезоны. В рассматриваемом эксперименте были получены представительные ряды данных также и в осенне-зимние и зимне-весенние периоды. Хотя результаты анализа некоторых из этих данных были рассмотрены выше, приведем здесь в качестве примера термической активности в холодное время года данные мониторинга, полученные в ноябре 2015 г. На рис. 8 показан фрагмент временных рядов профилей температуры с 10 по 18 ноября. В этот период были зарегистрированы три полных апвеллинга. Первый апвеллинг продолжался с 23:40 10 ноября до 19:00 11 ноября, второй – с 05:00 до 18:30 13 ноября, третий – с 14:00 16 ноября до 03:00 17 ноября. Апвеллинги формировались в условиях резких усилений западного ветра до 15 м/с. После окончания каждого апвеллинга наблюдались цуги нелинейных внутренних волн.



a



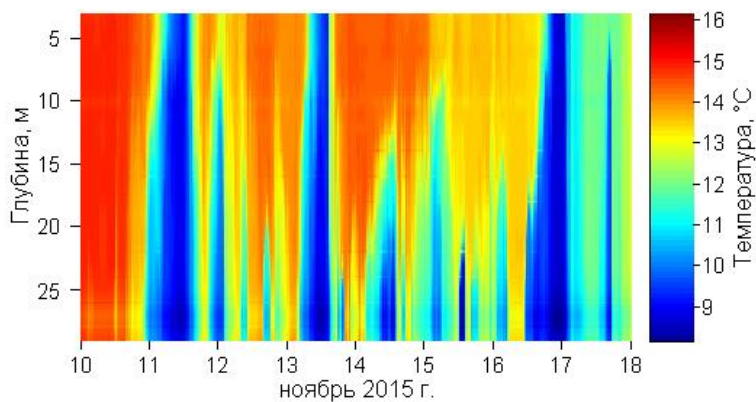
b

c

d

Р и с. 7. Распределение температуры при прохождении придонной одиночной внутренней волны 18 октября 2014 г. (*a*) и профили температуры до (*b*), во время (*c*) и после (*d*) ее прохождения

F i g. 7. Temperature distribution at passing of the near-bottom solitary internal wave on October 18, 2014 (*a*) and the temperature profiles before (*b*), during (*c*) and after (*d*) its passing



Р и с. 8. Полные апвеллинги в ноябре 2015 г.

F i g. 8. Full upwellings in November, 2015

Выводы. В течение 6,5 лет наблюдений на Черноморском гидрофизическом полигоне, расположенном в акватории Южного берега Крыма, получены долговременные ряды систематических данных о вертикальной термической структуре вод. Круглогодичные наблюдения выполнялись с высоким пространственно-временным разрешением, а их результаты позволяют не только уточнить, но и изменить некоторые из существующих представлений об особенностях эволюции термических процессов в шельфовой зоне Черного моря. В отличие от предыдущих наблюдений, выполнявшихся в этом регионе, в данном эксперименте были получены представительные данные об изменчивости температуры воды также и в холодные периоды года. Рассмотренные реализации термических явлений составляют лишь незначительную часть полученных материалов, более подробный анализ которых требует привлечения комплекса гидрометеорологических параметров и выходит за рамки данной статьи. Результаты эксперимента позволяют обоснованно предположить возможность и целесообразность использования системы наблюдений в качестве сегмента постоянно действующей сети прибрежных полигонов гидрофизических измерений в Черном море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лисиченок А. Д.* Интенсивные внутренние волны в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : МГИ НАНУ, 2005. Вып. 12. С. 49–59.
2. Internal wave bore in the shelf zone of the sea / V. Yu. Liapidevskii [et al.] // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017. Vol. 58, iss. 5. P. 809–818. <https://doi.org/10.1134/S0021894417050066>
3. 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. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-322-340
4. *Pritchard M., Weller R. A.* Observations of internal bores and waves of elevation on the New England inner continental shelf during summer 2001 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2005. Vol. 110, iss. C3. C03020. doi:10.1029/2004JC002377
5. *Badiy M., Wan L., Song A.* Three-dimensional mapping of evolving internal waves during the Shallow Water 2006 experiment // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013. Vol. 134, iss. 1. EL7. P. EL7–EL13. doi:10.1121/1.4804945
6. *Serebryany A.* Internal waves on a shelf // *Hydroacoustics*. 2014. Vol. 17, no. 1. P. 187–198. URL: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-b5a36445-3bb4-4a8e-ad13-d196625518e9/c/Serebryany.pdf> (date of access: 15.01.2020).
7. Observations of nonlinear internal waves at a persistent coastal upwelling front / R. K. Walter [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2016. Vol. 117. P. 100–117. doi:10.1016/j.csr.2016.02.007
8. Statistics of internal tide bores and internal solitary waves observed on the inner continental shelf off Point Sal, California / J. A. Colosi [et. al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2018. Vol. 48, No. 1. P. 123–143. doi:10.1175/JPO-D-17-0045.1
9. *Иванов В. А., Серебряный А. Н.* Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1985. Т. 21, № 6. С. 648–656.
10. *Блатов А. С., Иванов В. А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). К. : Наукова думка, 1992. 244 с.
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.

12. Исследования внутренних волн и течений в Черном море с платформы Морского гидрофизического института летом 2014 г. / А. Н. Серебряный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : МГИ РАН, 2014. Вып. 28. С. 62–70.
13. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море / А. Г. Зацепин [и др.] // Океанология. 2016. Т. 56, № 2. С. 203–214. doi:10.7868/S0030157416020222
14. Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением / К. П. Сильвестрова [и др.] // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 521–530. doi:10.7868/S0030157417040013
15. *Очердник В. В., Запелалов А. С.* Исследование короткопериодной изменчивости поля температуры на Черноморском гидрофизическом полигоне Института океанологии РАН // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 1. С. 44–49. doi:10.22449/2413-5577-2018-1-44-49
16. A fast and accurate thermistor string / H. van Haren [et. al.] // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2001. Vol. 18, No. 2. P. 256–265. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0256:AFAATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0256:AFAATS>2.0.CO;2)
17. *Nam S., Send U.* Direct evidence of deep water intrusions onto the continental shelf via surging internal tides // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2011. Vol. 116, iss. C5. C05004. doi:10.1029/2010JC006692

Об авторах:

Толстошеев Алексей Петрович, старший научный сотрудник, отдел инновационных технологий, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0771-0879**, **ResearcherID: G-1901-2014**, **Scopus Author ID: 56828803500**, tolstosheev@marlin-yug.com

Мотыжев Сергей Владимирович, старший научный сотрудник, отдел инновационных технологий, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8438-2602**, **Scopus Author ID: 65073545040**, motyzhev@marlin-yug.com

Лунев Евгений Геннадьевич, научный сотрудник, отдел инновационных технологий, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7138-3024**, **Scopus Author ID: 23994266100**, lunev@marlin-yug.com