

УДК 551.465

ПРИМЕРЫ ПОДХОДОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВОД ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ ПРИ ПОМОЩИ КЛАСТЕРА ТЕРМОКОС

© 2020 г. В. В. Очередник¹, А. Г. Зацепин^{1,2, *}, С. Б. Куклев¹,
В. И. Баранов¹, В. В. Машура¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (государственный университет),
Московская область, Долгопрудный, Россия

*e-mail: zatsepin@ocean.ru

Поступила в редакцию 14.10.2019 г.

После доработки 28.10.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Описана методика исследования пространственно-временной изменчивости температуры водной среды шельфовой зоны Черного моря при помощи кластера заякоренных цепочек температурных датчиков (термокос). Этот кластер, состоящий из трех разнесенных в пространстве термокос, располагается на внутреннем шельфе северо-восточной части Черного моря и функционирует в составе Полигона “Геленджик” (ИО РАН). Показано, что кластер позволяет эффективно регистрировать короткопериодную пространственно-временную изменчивость поля температуры. Установлены количественные характеристики этой изменчивости, а также внешние определяющие ее факторы, одним из которых являются внутренние волны. Изменчивость температуры позволяет определить амплитуду колебаний, а регистрация этих колебаний на разнесенных в пространстве термокосах — скорость и направление распространения внутренних волн. Приведены некоторые примеры регистрации цугов короткопериодных внутренних волн. С помощью различных методов визуализации показана временная изменчивость распределения температуры по вертикали.

Ключевые слова: Черное море, шельфовая зона, температура воды, пространственно-временная изменчивость, внутренние волны, фронты, кластер заякоренных цепочек температурных датчиков

DOI: 10.31857/S0030157420010189

Одной из актуальных задач гидрофизики морей и океанов является исследование короткопериодной и субмезомасштабной изменчивости динамики вод и гидрологической структуры. Эта изменчивость связана с процессами, характеризующимися высоким уровнем диссипации энергии, которая поступает к ним от процессов большего пространственно-временного масштаба. Особенно велика важность исследования короткопериодных и субмезомасштабных процессов в шельфовой зоне, где диссипативные процессы особенно ярко выражены [13].

Для исследования короткопериодных и субмезомасштабных процессов необходимо использовать методы и средства измерений, обеспечивающие получение данных с высоким пространственно-временным разрешением. К средствам такого рода относятся так называемые “термокосы” — гирлянды термодатчиков, обеспечивающие получение вертикальных распределений температуры с разрешением порядка одного или

нескольких метров по вертикали и с временным разрешением от десятков секунд до десятков минут [12]. Термокосы уже на протяжении многих лет используются для регистрации короткопериодной изменчивости вертикальных распределений температуры, в том числе, и в Черном море [1, 15]. При этом с их помощью исследовались, например, нелинейные внутренние волны на черноморском шельфе с платформы МГИ РАН в Качивели [9].

С целью оснащения Полигона “Геленджик” ИО РАН различными видами автоматических гидрофизических измерительных средств, в 2012 г., на базе ЮО ИО РАН была осуществлена разработка и организовано производство термокос собственного изготовления. Термокосы, разработанные и изготавливаемые в ЮО ИО РАН, за последние несколько лет зарекомендовали себя как надежный инструмент, используемый для изучения вертикальной термической структуры вод шельфа и ее пространственно-временной измен-

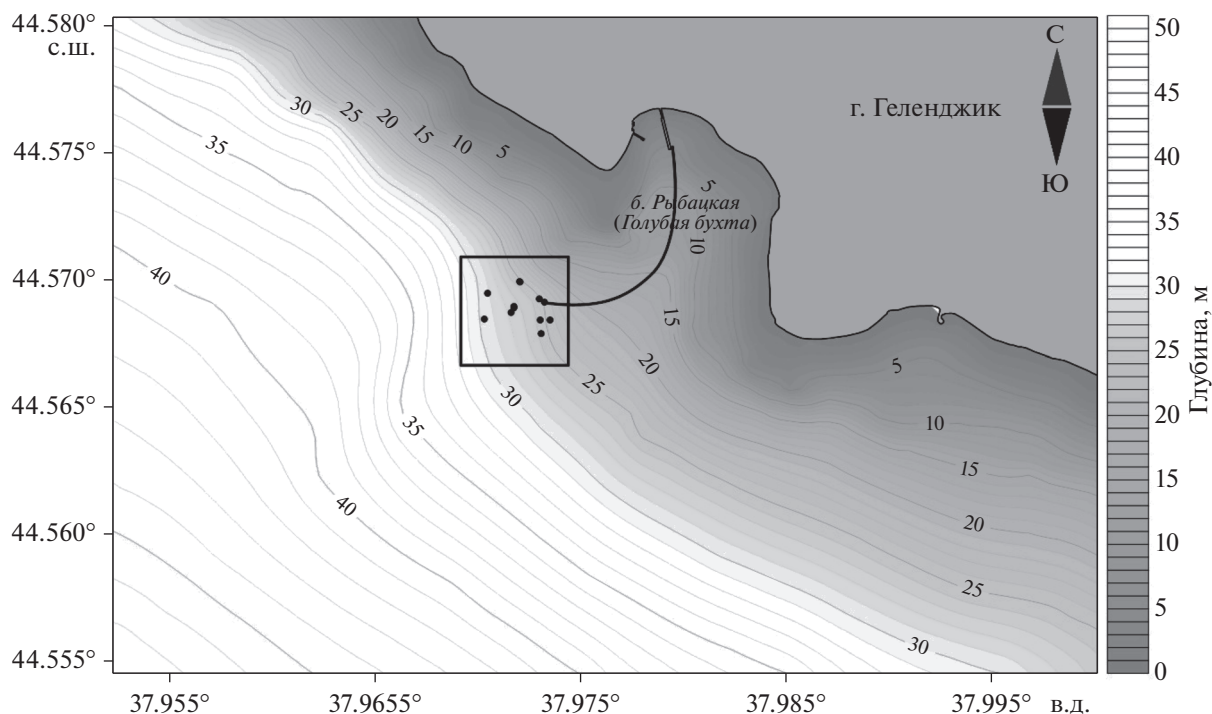


Рис. 1. Область расположения кластеров термокос (точки внутри квадрата) в период с весны 2018 г. по настоящее время. Черная изогнутая линия – оптоволоконный кабель, проложенный по морскому дну.

чивости [2–5, 10, 11]. По данным термокос на акватории Полигона “Геленджик” исследовались изменчивость температуры верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и сезонного термоклина, влияние на температуру воды ветрового воздействия, осадков, речного стока. К числу интересных явлений, которые надежно регистрируются этим инструментом, относятся короткопериодные внутренние волны (ВВ), температурные фронты различного происхождения [4, 8]. При этом кластером близкорасположенных термокос определяются не только амплитуда и частотные характеристики ВВ, но также скорость и направление их распространения.

В настоящей работе описываются результаты исследования внутрисезонной и короткопериодной изменчивости вертикальной термической структуры вод шельфа на акватории Полигона “Геленджик”, полученные на основе анализа данных измерений разнесенного в пространстве кластера термокос. Очевидно, что использование данного измерительного комплекса возможно и в других местах Мирового Океана в том числе, на его разнообразном по своим характеристикам шельфе.

ОПИСАНИЕ КЛАСТЕРА ТЕРМОКОС ЮО ИО РАН – “ТЕРМОКЛАСТЕРА”

Кластер термокос размещен на акватории Полигона “Геленджик” [2] на глубине дна около

26 м (рис. 1). Здесь же расположена постоянно действующая донная станция в составе доплеровского акустического профилографа ADCP 600 Гц. Весь измерительный комплекс подсоединен к бронированному оптоволоконному кабелю с двумя токопроводящими жилами, по которому осуществляется питание приборов и оперативная передача данных измерений на береговой сервер. Термокосы состоят из 20 и более термодатчиков и нескольких датчиков давления, сопряженных в едином корпусе с термодатчиками. Все датчики располагаются на одинаковом расстоянии друг от друга, составляющем от 1 до 2-х м. Термокосы размещаются на шельфе, на глубинах от 22 до 88 м на заякоренных буйковых станциях с подповерхностной плавучестью представляющей собой буй, притопленный на глубину от четырех до восьми метров. Точность измерений температуры составляет 0.01°C , период измерения – 10 с для термокос, работающих в составе кластера и 2 мин для термокосы, установленной на бровке шельфа (86–88 м). С более подробным описанием термокос можно ознакомиться в работе [3].

Кластер термокос был установлен впервые на акватории Полигона “Геленджик” весной 2018 г. С тех пор по настоящее время (сентябрь 2019 г.), он переставлялся несколько раз. При этом изменялись его положение и конфигурация. Места постановки термокластера с приведенными гео-

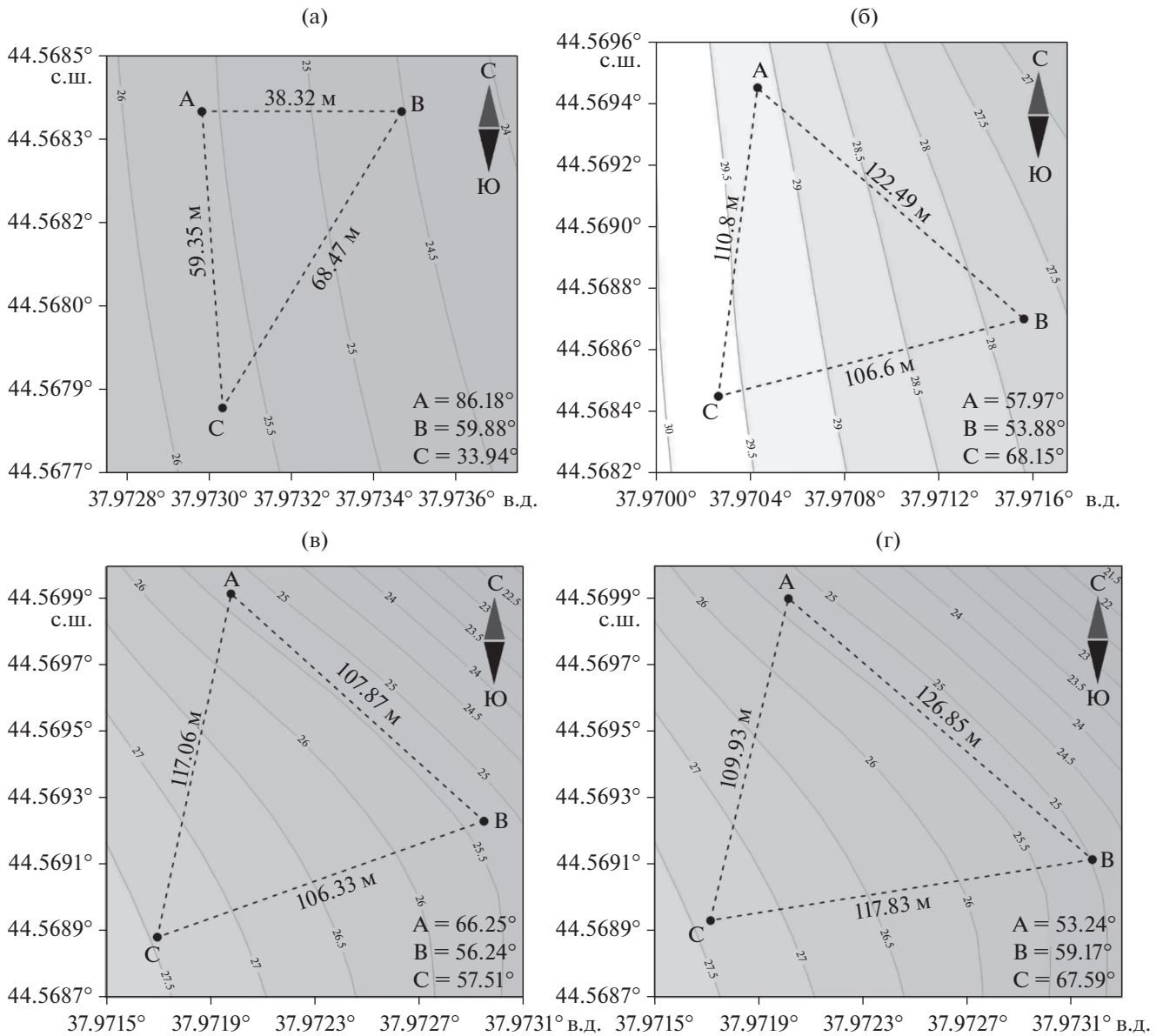


Рис. 2. Конфигурация кластера термокос, функционировавших в период: с 24.04.2018 г. по 10.07.2018 г. – (а); с 28.09.2018 г. по 17.02.2019 г.; – (б); с 24.04.2019 г. по 15.05.2019 г. – (в); с 17.05.2019 г. по настоящее время – (д).

графическими координатами показаны на рис. 1 и 2 соответственно.

Подробная ориентация кластера термокос и расстояние между термокосами в периоды различных их постановок показаны на рис. 2. Как видно из рис. 2, первичная постановка кластера термокос в апреле 2018 г. значительно отличалась от последующих постановок, не только формой треугольника и его пространственной ориентацией, но и своим масштабом, который охватывал площадь почти в 4 раза меньшую, чем последующие постановки.

Оптимальной формой установки кластера из трех термокос является равносторонний тре-

угольник, чего в морских условиях на глубокой воде добиться крайне сложно. Поэтому геометрические формы кластера в разных постановках отличались друг от друга. Анализ результатов первого эксперимента, выполненного весной 2018 г., показал, что расстояние между термокосами в кластере (~50 м) было выбрано неудачно, т.к. такое расстояние не всегда является достаточным для определения характеристик ВВ. Было принято решение увеличить расстояние между термокосами в 2 раза. При последующих постановках оно составило около 100–120 м, что позволило повысить достоверность определения характеристик ВВ.

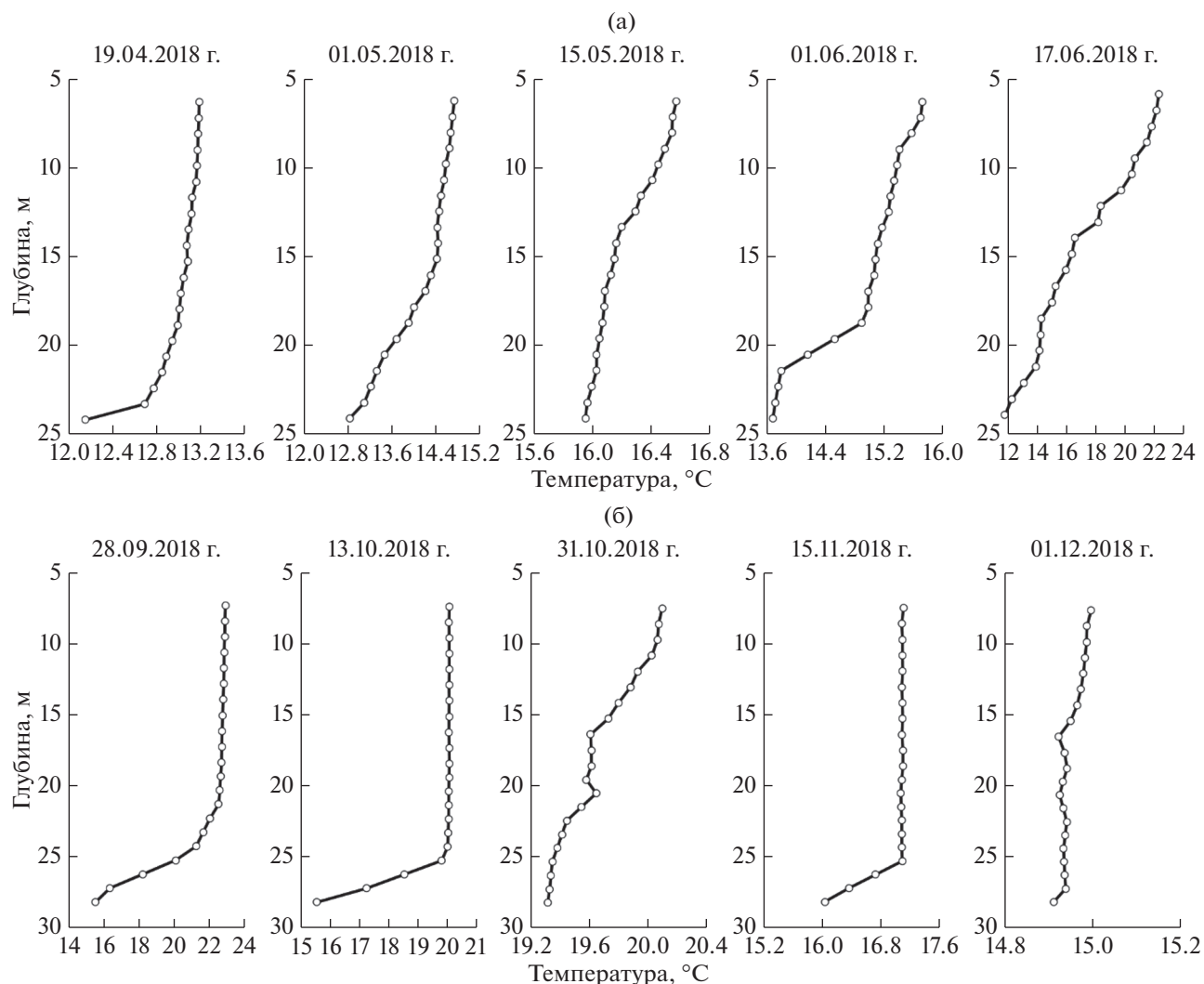


Рис. 3. Вертикальное распределение температуры весной—летом (а); осенью (б).

КОРОТКОПЕРИОДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЕЕ ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Для графического представления изменчивости вертикального распределения температуры данные с термокос разделялись на циклы и отображались в различных видах, как то:

- вертикальное распределение температуры (профили);
- вертикальное распределение изотерм во времени;
- распределение температуры с привязкой к глубине расположения датчиков;
- комплексные вертикальные гистограммы;
- пространственные распределения температуры для 3-х термокос;
- временная изменчивость показаний датчиков давления.

На рис. 3а, 3б представлены не сглаженные (точечные) профили температуры для различных моментов времени измерения.

Профили строятся по данным регулярных синхронных измерений термодатчиков, проводящихся каждые 10 с. Для визуализации данных в реальном времени в среде Matlab написана программа, которая автоматически с интервалом в 0.5 с опрашивает последовательный порт (RS-232) и при получении пакета данных совершает расчеты по построению и сглаживанию профилей. Методом вычитания сглаженного профиля из несглаженного выявляются температурные аномалии. Производится анализ качества данных, выявляются и отбраковываются сбойные измерения.

Из рис. 3 видно, что весенне-летние распределения потенциальной температуры (рис. 3а) в большинстве своем характеризуются наличием сезонного термоклина в слое 5–25 м, тогда как осенние (рис. 3б) в основном характеризуются

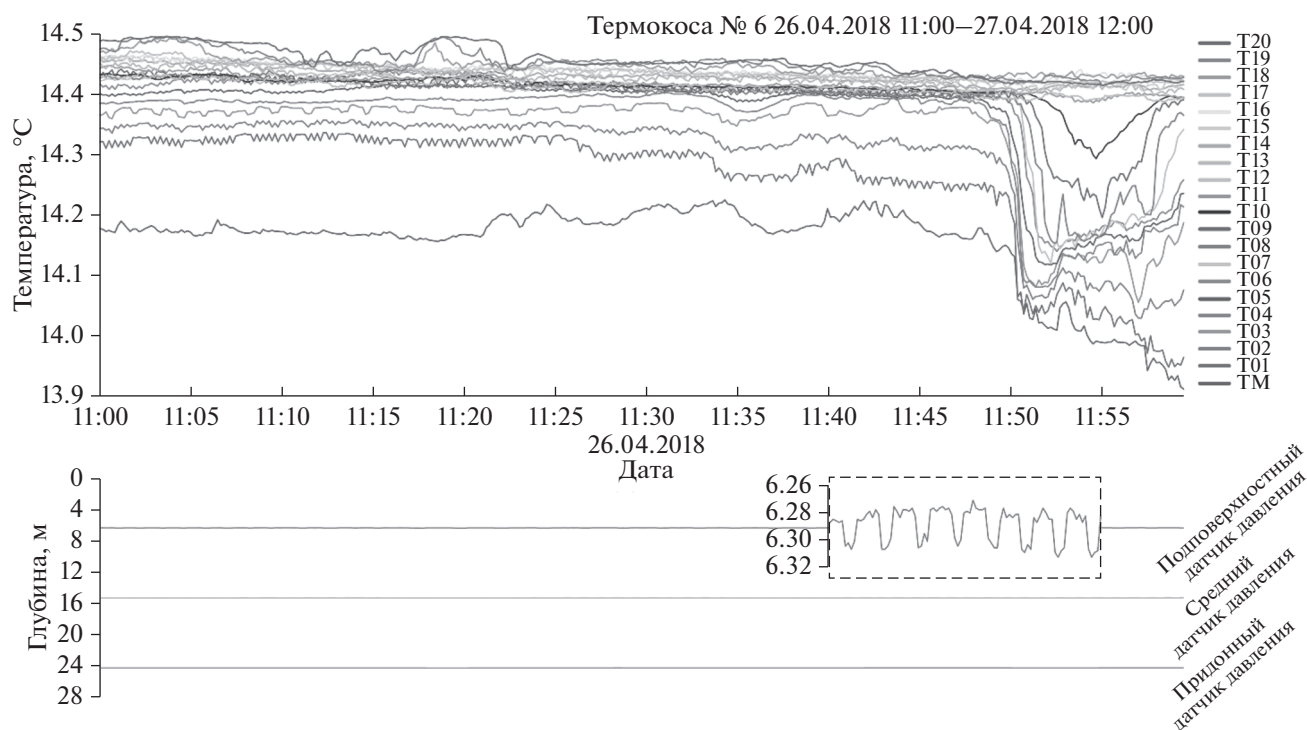


Рис. 4. Температура воды в часовом цикле измерений термодатчиков (а). Показания датчиков давления (б). Пунктирным прямоугольником выделен фрагмент масштабного увеличения показаний подповерхностного датчика давления. Видно, что масштаб колебаний не превышает 4 см.

отсутствием стратификации в этом слое: скачок температуры располагается ниже. В дальнейшем планируется более детально изучить сезонную эволюцию толщины ВКС и глубины залегания термоклина с использованием данных термокос.

При получении 360 пакетов данных, т.е. раз в час, строятся часовые циклы положения изотерм (рис. 4). После этого данные усредняются и сохраняются в долговременной памяти ПК, как среднечасовые значения.

На рис. 4 наглядно показано, как в течение одного часа изменяется температура на горизонте расположения каждого термодатчика. Легенда справа (в оттенках серого) показывает расположение датчиков по глубине относительно друг друга. ТМ (TemperatureMainSensor) расположен непосредственно над дном (60 см), Т20 находится под подповерхностной плавучестью на глубине ~6 м. На графике отображаются показания 3-х датчиков давления, смежных с придонным (ТМ), приповерхностным (Т20) и промежуточным (Т10) датчиками температуры соответственно. Расстояние между каждым датчиком температуры составляет 1.0–1.1 м. Данные по давлению отображаются исключительно для контроля стабильности положения термокосы.

На более же продолжительных масштабах времени по ним можно визуализировать наличие

сильного течения, наклоняющего термокосу и заглубляющего подповерхностную плавучесть, а также штормов, вызывающих волнение, которое колеблет подповерхностную плавучесть, дергает термокосу и иногда приподнимает донный якорь (рис. 5). При этом возможно перемещение термокосы, пример которого был приведен в работе [3].

В то же время приповерхностный и придонный датчики давления выступают как своего рода маркеры области измерения температуры. Они ограничивают зону температурного профиля, зону возможной интерполяции значений температуры, сглаживания профиля. Пример изменения расстояния между датчиками в результате штормовых воздействий приведен на рис. 5, на котором совмещены показания датчиков давления и температуры. Штормовые воздействия сопровождалась румбами южных ветров и шквальным ветром до 17 м/с. Амплитуда волн достигала 4–6 м, подповерхностная плавучесть периодически оказывалась на поверхности воды. Все это отразилось в виде высокочастотного “шума” в показаниях верхнего и нижнего датчиков давления (см. рис. 5).

При стандартном графическом отображении данных используются два окна с выведенными значениями. Пример первого окна приведен на рис. 4. В нем отображаются последние 360 пакетов данных измерений термодатчиков. Во втором

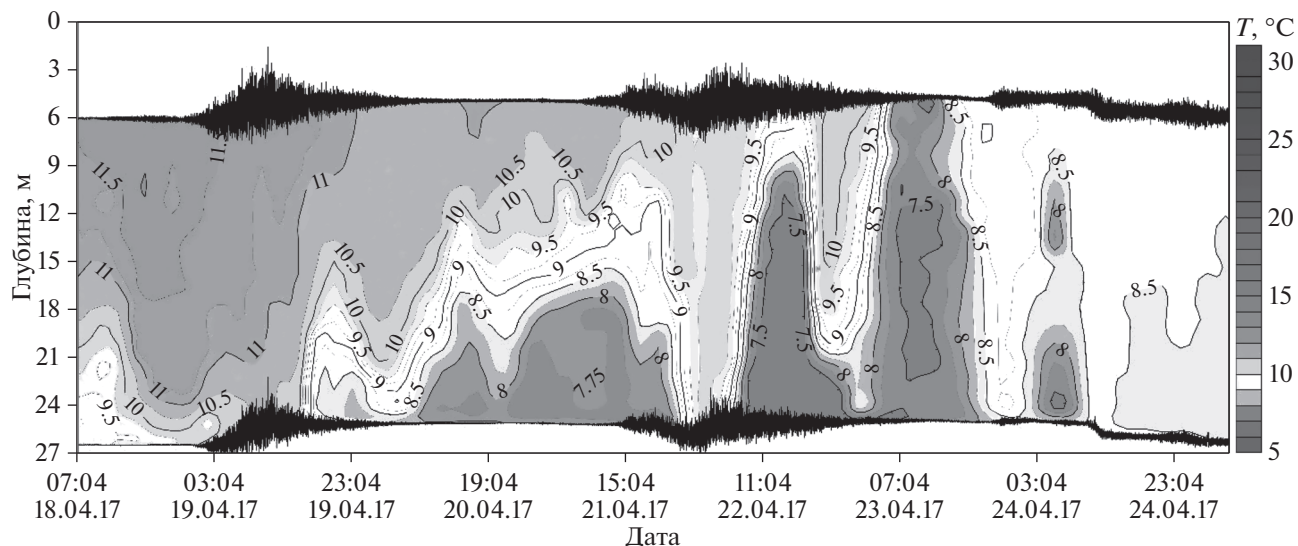


Рис. 5. Недельное (с 18.04.2018 г. 07:00 по 25.04.2018 г. 07:00) распределение изотерм по вертикали в период штормов, идентифицируемых по показаниям (“шуму”) датчиков давления. Из-за перемещения термоксы штормовыми волнами изменяется глубина ее постановки, что также отражается на показаниях датчиков давления.

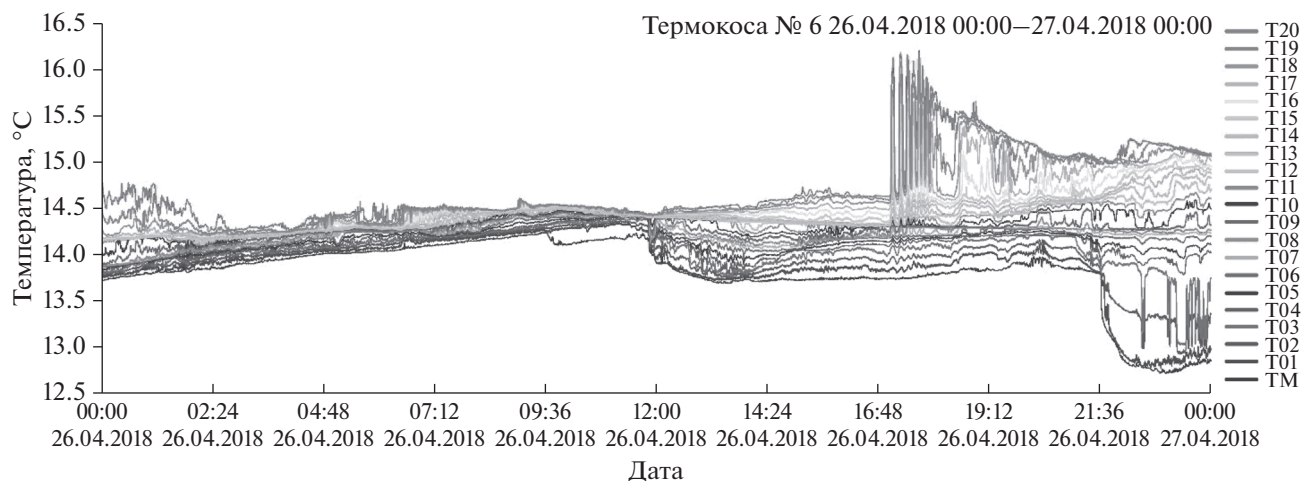


Рис. 6. Суточный цикл показаний термодатчиков 26.04.2018 г.

окне (рис. 6) представлены графики показаний термодатчиков в суточном цикле: с 00:00 до 24:00 ч.

Из рис. 4 и 6 видно, как быстро могут происходить изменения температуры на горизонте расположения датчиков, какие сильные трансформации профиля температуры случаются за считанные минуты! Природа этих трансформаций нуждается в исследовании.

На рис. 7 представлены фрагменты записей показаний термодатчиков сделанных в разное время 24 апреля 2018 г. (см. также рис. 6). Из этого рисунка следует, что изменение показаний термодатчиков может иметь преимущественно квазирегулярный (рис. 7а), регулярный (рис. 7в) и нерегулярный (рис. 7 б, 7г) характер. При этом

показания разных термодатчиков в одно и то же время демонстрируют различные виды изменчивости температуры, свидетельствующие о послойном характере происходящих процессов. Так, на рис. 7а на верхних четырех датчиках проявляется интенсивная квазирегулярная короткопериодная (несколько минут) изменчивость температуры, тогда как ниже, на следующих трех датчиках, она практически не проявляется. Затем квазирегулярная изменчивость опять усиливается, потом снова ослабевает и практически не проявляется на придонных горизонтах.

На рис. 7б показан пример разнонаправленного изменения температуры в верхней и нижней частях термоклина. В верхней его части темпера-

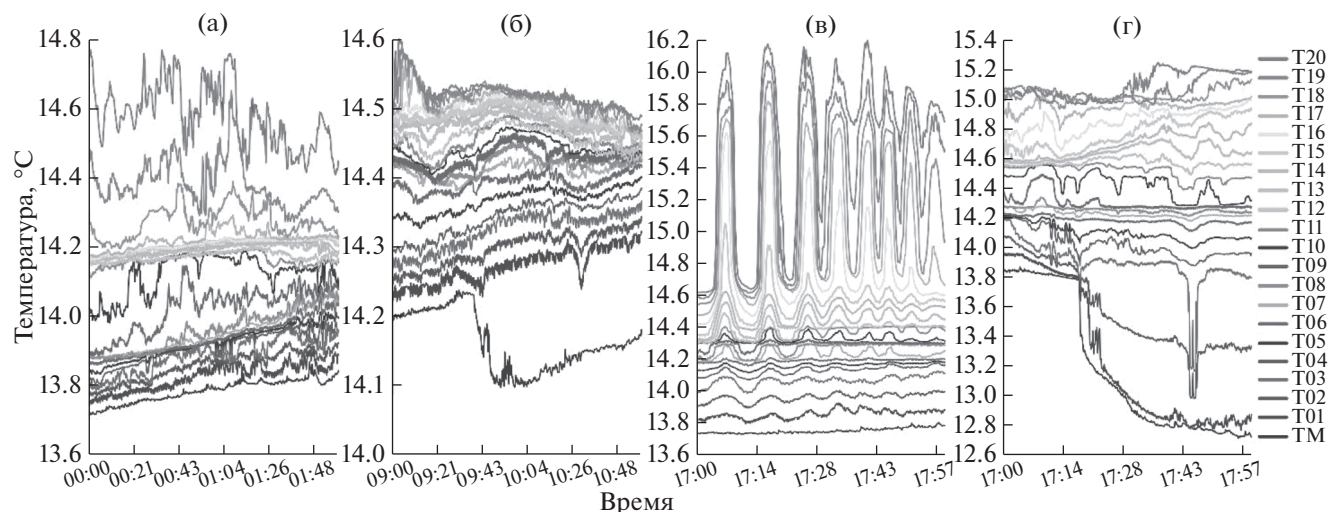


Рис. 7. Фрагменты записи измерений термодатчиков 26.04.2018 г. (см. также рис. 8): с 00:00 до 02:00 (а); с 09:00 до 11:00 (б); с 17:00 до 18:00 (в); с 21:00 до 23:00 (г).

тура убывает, а в нижнем — возрастает. При этом на нижнем датчике в середине цикла наблюдается резкое понижение температуры, по-видимому, обусловленное подтоком холодной воды снизу.

На рис. 7в представлен пример прохождения цуга короткопериодных волн через акваторию термокластера. Верхние три датчика показывают почти синхронное периодическое изменение температуры. Данный цуг состоял из 8 волн, наблюдавшихся на акватории термокластера на протяжении чуть более одного часа.

Температурная изменчивость, представленная на рис. 7г, имеет схожие черты с изменчивостью, представленной на рис. 7б. Здесь на нижних трех датчиках в середине цикла наблюдается резкое понижение температуры, свидетельствующее о развитии неполного апвеллинга [10, 11]. При этом на “средних” датчиках наблюдаются квазипериодические колебания, возможно обусловленные внутренними волнами, а на верхних датчиках во второй половине цикла имеет место небольшое повышение температуры, обусловленное, по-видимому, дневным прогревом.

Подытоживая обсуждение примеров короткопериодной изменчивости распределения температуры в весенний период года, представленных на рис. 7, следует еще раз отметить ее разнообразный и многомодовый характер, свидетельствующий о существовании различных физических процессов, действующих в области развивающегося сезонного термоклина.

Полезным методом графического представления данных измерений является шкала комплекса вертикальных гистограмм (Vertical Bar Charts — функция bar() в Matlab <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/bar.html>), которая наглядно пока-

зывает наличие термоклина и ВКС, изменчивость их положения и толщины соответственно (рис. 8).

Такое отображение данных измерений достигается путем наложения множества вертикальных гистограмм на временную развертку таким образом, чтобы они плотно стыковались друг с другом: за счет этого на рисунке создается градиентная заливка. При многократной повторяемости температуры формируется плотная заливка в области термоклина, а отображение температуры выше термоклина остается достаточно прозрачным. Благодаря этому, ВКС можно четко идентифицировать и достаточно точно определить его толщину. Серой линией на рис. 8 отображается измерение температуры подповерхностным датчиком: значения и изменчивость температуры в приповерхностном слое моря.

Можно также анализировать изменчивость вертикального градиента температуры. Оценивая максимальное значение градиента, осуществлять при этом выборку глубины его залегания с тем, чтобы определять толщину ВКС. Данный метод показывает, что скачок температуры в верхней части термоклина присутствует далеко не всегда в ранневесеннее время. Кроме того, сгонно-нагонные процессы, порождают неоднородности температуры в области ВКС и затрудняют определение его толщины.

Представление временного хода в виде изотерм (рис. 9) позволяет достаточно подробно отобразить трансформацию вертикального распределения температуры в рассматриваемый период времени, выделить события апвеллинга и даунвеллинга, усиления и ослабления температурной стратификации. Однако, вследствие при-

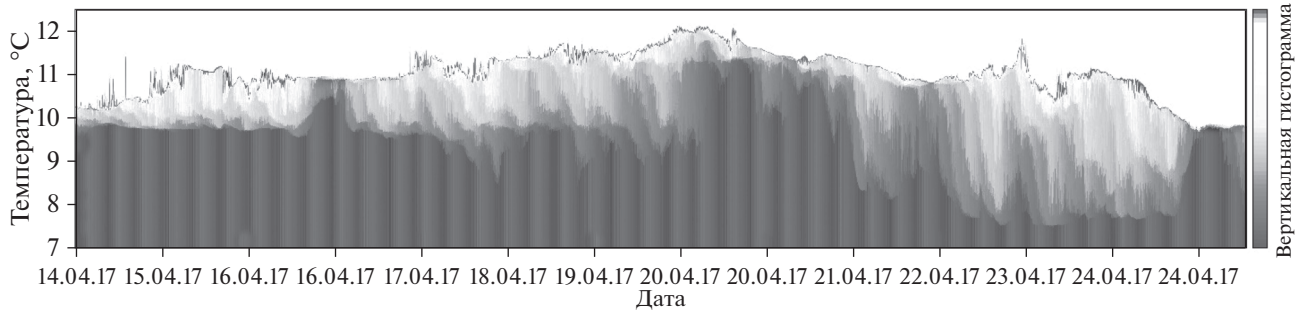


Рис. 8. Десятисуточная комплексная гистограмма изменения температуры (с 14.04.2018 по 24.04.2018 г.). Пояснения в тексте.

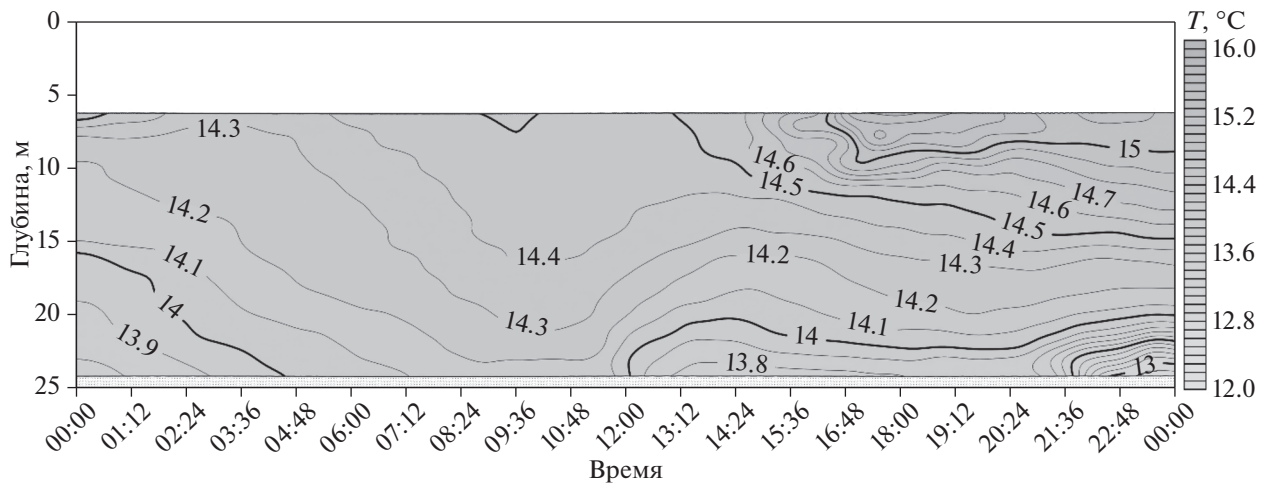


Рис. 9. Суточное отображение изменчивости температуры в виде изотерм.

менения процедур сглаживания и интерполяции при переходе от значений температуры на термодатчиках к изотермам, теряется острота пульсаций температуры, их послышный характер. Поэтому наиболее короткопериодную и мелкомасштабную изменчивость температуры гораздо легче проследить, используя представление ее временного хода на каждом из датчиков (рис. 4). При этом представлении удастся выявить резкие температурные фронты как в верхнем, так и в придонных слоях моря, прохождение цугов внутренних волн, события турбулентного перемешивания, обусловленные ветровым воздействием и сдвиговой неустойчивостью течения. Очевидно, что при дальнейшем исследовании короткопериодной изменчивости температуры по данным термокос и факторов, вызывающих эту изменчивость, прежде всего, будет использоваться именно это представление данных с минимальным сглаживанием данных, или же вообще без их сглаживания.

Сопоставление между собой рис. 4 и 9, в частности, показывает, что цуг короткопериодных внутренних волн, наблюдающийся на рис. 4 между 17 и 18 часами, связан с вторжением на акваторию

термокластера поверхностного языка теплой воды (рис. 9). Фактически, внутренние волны “сидят” на фронте этого языка. Поскольку он не проникает в глубинные и придонные слои моря, сильные колебания температуры наблюдаются только на верхних пяти – шести термодатчиках.

РАСЧЕТ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Как уже указывалось выше, термокластер является хорошим инструментом для регистрации и исследования характеристик термических фронтов и внутренних волн в сезонном термоклине. В частности, синхронные данные трех разнесенных на некоторое расстояние термокос позволяют определить фазовую скорость и направление распространения внутренних волн. Опишем подход, позволяющий это делать.

Будем считать, что фронт ВВ является двумерным, т.е. вытянут в направлении, перпендикулярном направлению распространения ВВ, и перемещается с постоянной скоростью на масштабе термокластера и в различные моменты времени отображается каждой из термокос в виде скачка

температуры. Параметры, используемые для расчета скорости и направления распространения ВВ, регистрируемых термокластером, изображены на рис. 10.

Направление распространения фронта ВВ указано пунктирной стрелкой и соответствует направлению снизу вверх; утолщенной стрелкой показано направление на север (N). A, B, C – точки постановки термокос; a, b, c – известные расстояния между термокосами; α, β, γ – углы между сторонами треугольника, образуемого термокосами; ψ – угол между одной из сторон треугольника (BC) и направлением на север; t1, t2 – время прохождения фронта ВВ между термокосами В и С, и С и А соответственно; BD – кратчайшее расстояние по направлению распространения фронта ВВ от термокосы В к термокосе С.

По свойству прямоугольных треугольников, имеющих общую гипотенузу, угол η = ζ, а угол λ = μ, следовательно, угол β = η + λ. Исходя из этого, можно записать, что: λ = β - η.

Скорость для первого участка (путь фронта от термокосы В к термокосе С) можно выразить следующим образом:

$$V_1 = \frac{b \sin(\eta)}{t_1}, \quad (1)$$

для второго:

$$V_2 = \frac{c \sin(\beta - \eta)}{t_2}, \quad (2)$$

Используя тригонометрическую формулу для синуса разности двух углов, можно привести (2) к виду (3):

$$V_2 = \frac{c \sin(\beta) \cos(\eta) - c \cos(\beta) \sin(\eta)}{t_2}, \quad (3)$$

Считая, что V1 = V2 и приравняв (1) и (3), получим:

$$\frac{b \sin(\eta) t_2}{t_1} = c \sin(\beta) \cos(\eta) - c \cos(\beta) \sin(\eta). \quad (4)$$

Используя ряд тригонометрических функций и преобразований, можно привести уравнение расчета направления распространения ВВ в термокластере к виду (5):

$$\operatorname{ctg}(\eta) = \frac{b \frac{t_2}{t_1} + c \cos(\beta)}{c \sin(\beta)}. \quad (5)$$

После нахождения направления распространения волнового фронта в кластере, определим его азимут относительно севера:

$$90 - (\eta + \psi). \quad (6)$$

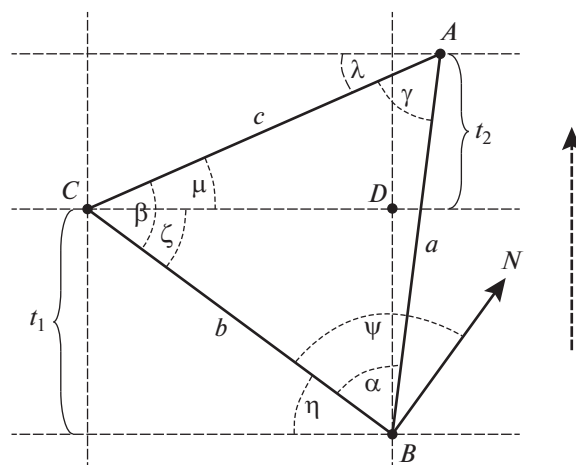


Рис. 10. Параметры, используемые для расчета скорости и направления распространения ВВ в области термокластера. Пояснения в тексте.

Начало волнового фронта можно определить, построив диаграмму изменения температуры на датчиках между двумя последовательными измерениями, интервал времени между которыми составляет 10 с. Крутизна температурного фронта будет определяться формулой:

$$\frac{T_2 - T_1}{\Delta t}. \quad (7)$$

Здесь Δt – интервал времени между последовательными измерениями, а T1 и T2 – последовательные значения температуры измеряемой датчиком.

Идентификация термических фронтов является наиболее очевидной, если температура изменяется резко и фронт можно визуализировать как “скачок” (рис. 11а, 11б).

При более плавном изменении температуры, проявляющемся на каждой из термокос, для оценки скорости распространения температурных возмущений, вызванных короткопериодными ВВ, можно использовать временные интервалы между соответствующими максимумами или же минимумами температуры, регистрируемыми термодатчиками на каждой из термокос.

Представим и проанализируем более детально пуг короткопериодных ВВ, наблюдавшийся между 17 и 18 часами 26 апреля 2018 г. (см. рис. 7в и 9б). Уже указывалось, что наиболее хорошо ВВ проявляются на верхних горизонтах от 6 до 12 м (сенсоры ТТ 20-15). При этом, благодаря использованию данных всех трех термокос, удастся установить, что первое колебание температуры, связанное с этим цугом, фиксируется на термокосе С, которая расположена дальше всего от берега. Далее данное колебание прослеживается на термокосе А, затем на термокосе В (рис. 11а). Все-

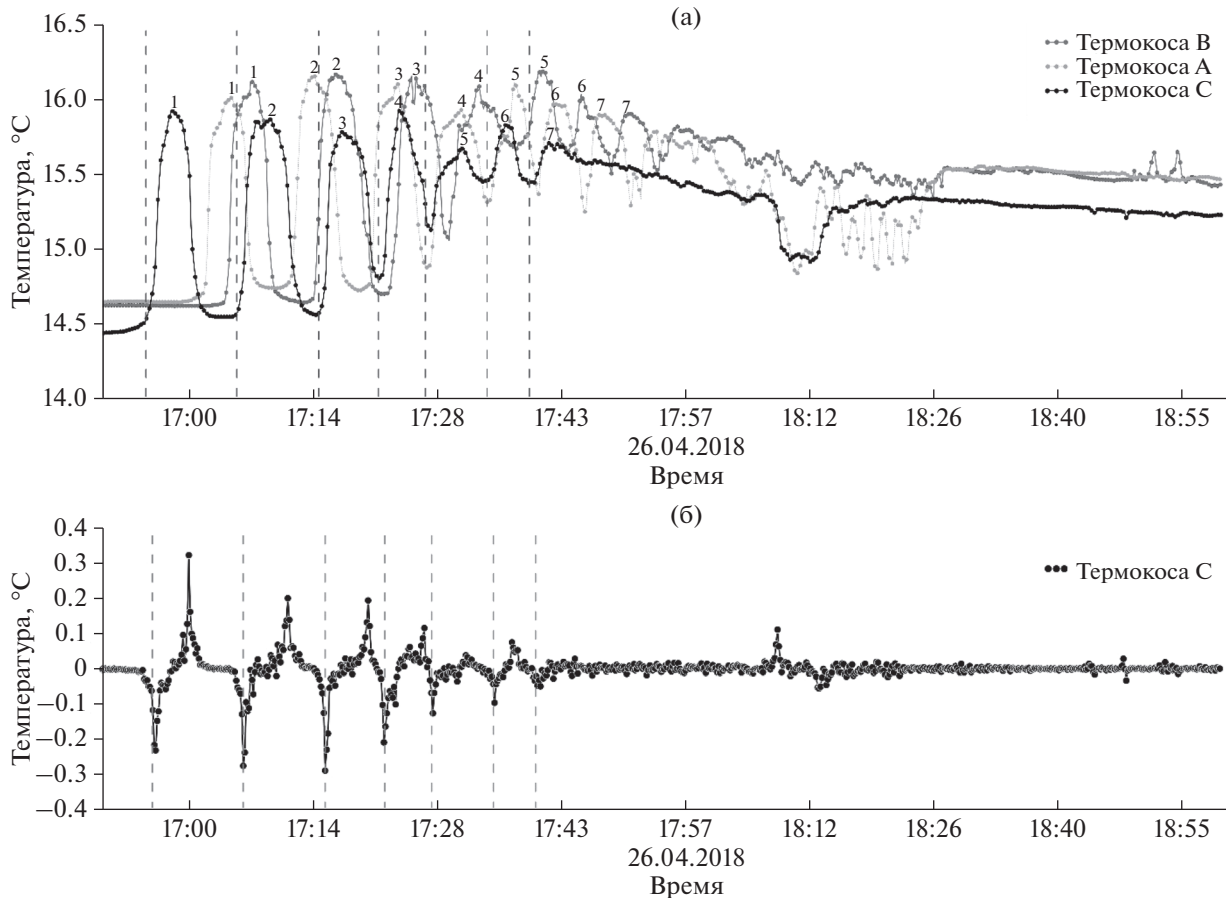


Рис. 11. (а) – совмещенные данные поверхностных датчиков термокос: регистрация прохождения цуга ВВ в течение одного часа. Цифры 1, 2, 3..., 7 – проходящие волны, пунктирные линии – начало проявления волн; (б) – градиент температуры от времени для термокосы С.

го было выявлено 7 четко выраженных колебаний температуры на всех термокосах, смещенных по времени друг от друга. Длительность регистрации этого пакета внутренних волн составляет около 70 мин. Размах изменения температуры составляет от 1.5°C для первого колебания и до 0.5°C для последнего. Период колебаний – около 10 мин.

Применяя к данной ситуации метод расчета, описанный в начале данного параграфа, получим, что направление распространения ВВ является северо-восточным (азимут = 31°) и приблизительно перпендикулярным изобатам. Скорость распространения волн составляет 0.11 м/с и не изменяется существенно от первого колебания до последнего.

Поскольку по метеоданным погода в Геленджике в этот день была маловетреной и малооблачной, цуг таких интенсивных и приближенных к поверхности ВВ должен был визуализироваться и на самой морской поверхности в виде чередующихся полос ряби и сликов [8, 9]. Фрагмент спутникового снимка исследуемой акватории Santinel-2, оснащенного оптико-электронным

мультиспектральным сенсором для съемок с разрешением от 10 до 60 м в видимой области спектра, сделанный в этот же день, 26 апреля 2018 г., представлен на рис. 12.

Моменты времени пролета спутника и регистрации ВВ термокластером не совпадают: спутник сфотографировал морскую поверхность в 8:17 UTC, что на 5.5 ч раньше проявлений ВВ зарегистрированных кластером. Учитывая рассчитанную скорость распространения ВВ (0.11 м/с) и направление их распространения (31°), внутренние волны, проявившиеся на спутниковом снимке в двух километрах мористее термокластера (их примерное положение отмечено белой стрелкой и кругом на рис. 12), должны были достигнуть акватории термокластера к 17 ч, что и произошло в действительности.

Следует отметить, что наклон сликовых полос на снимке (рис. 12) не совсем совпадает с рассчитанным направлением распространения ВВ. Это не представляется удивительным, так как при приближении к берегу ВВ должны разворачиваться таким образом, чтобы направление их рас-

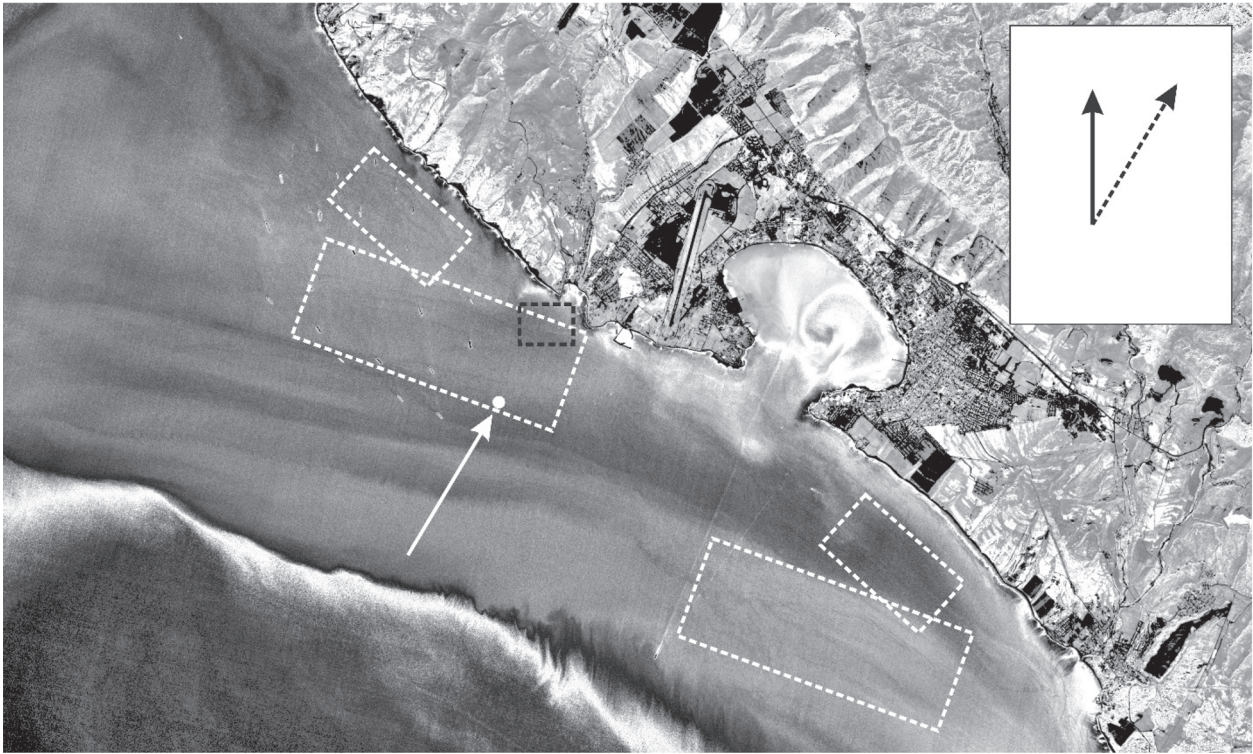


Рис. 12. Фрагмент спутникового снимка высокого разрешения Santinel-2 во время пролета спутника над акваторией Черного моря вблизи Геленджика от 26.04.2018 г., 08:17 UTC. Белые пунктирные прямоугольники – области проявления ВВ на морской поверхности, черный пунктирный прямоугольник – район постановки термокластера. На врезке: Черная толстая стрелка – направление на север, пунктирная стрелка – рассчитанное направление распространения ВВ в области термокластера. Белый кружок, на который указывает белая стрелка, – расчетное место, где могли бы находиться ВВ, позднее зарегистрированные термокластером.

пространения соответствовало перпендикулярно, направленному на берег.

В заключение работы, рассмотрим пример распространения термического фронта через акваторию термокластера. На рис. 13 приведена регистрация события, наблюдавшегося 27 апреля 2019 г. Было зарегистрировано распространение фронта теплой воды. Расчет по описанной выше методике показал, что скорость фронта волны равнялась 0.017 м/с. При этом направление распространения фронта составляло 276.2°, т.е. он перемещался с востока на запад.

Из этого же рисунка (рис. 13а) видно, что это же событие в инвертированном виде повторилось через некоторое время, при этом наблюдалось распространение фронта холодной воды. В этом случае, скорость фронта была больше чем в предыдущем в полтора раза – 0.031 м/с, а направление его распространения составляло 70°, что в большей степени соответствует направлению на берег. Можно предположить, что событие потепления воды на акватории кластера было связано с прохождением меандра течения.

Следует отметить, что близкий к вышеописанному эксперимент на Полигоне “Геленджик”

(ИО РАН) проводился ранее с сильно разнесенными термокосами: расстояние между ними составляло 7 км [11]. Регистрация проводилась только на двух термокосах, но одна термокоса находилась на внутреннем шельфе на глубине постановки 25 м, а вторая на траверзе м. Толстый (р-н Геленджика) на глубине 86 м. Было установлено, что термический отклик на благоприятствующее апвеллингу юго-восточное течение происходит сначала на более удаленных от берега датчиках, а затем регистрируется на прибрежной термокосе. Также в работе [4] была показана регистрация цуга ВВ и приведены его характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кластер близко расположенных заякоренных термокос, каждая из которых квазинепрерывно регистрирует температуру водной среды на различных горизонтах, позволяет не только отслеживать короткопериодные изменения вертикального профиля температуры, но и распределять амплитуду, скорость и направление распространения внутренних волн [6] и термических фронтов. Данная система является достаточно эффективным инструментом для получения оценок

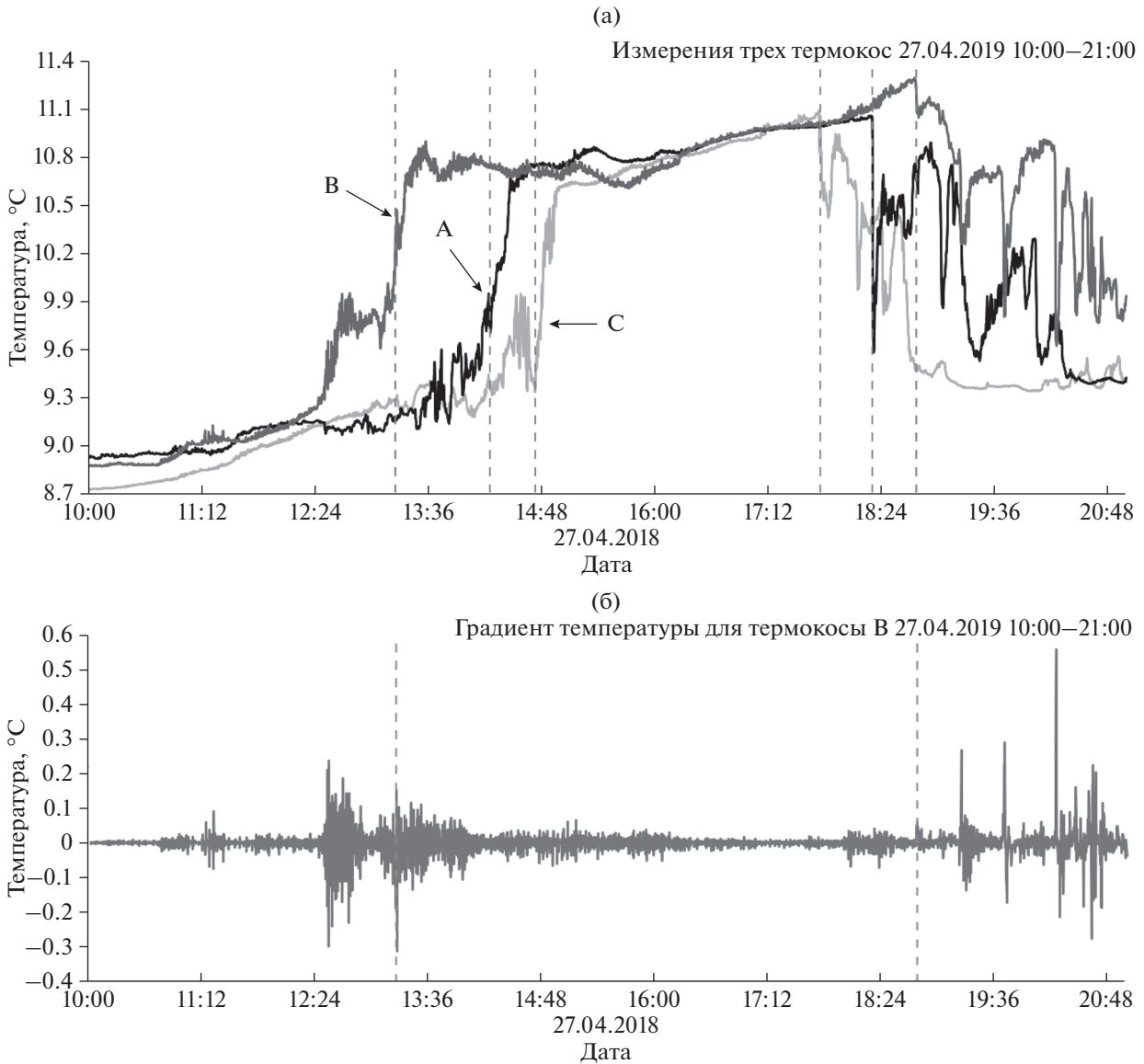


Рис. 13. (а) – совмещенные данные измерений трех термокос 27.04.2019 г. с 10:00 по 21:00: регистрация повышения и понижения температуры на 2°C на всей площади термокластера в течение 6-ти часов. А, В, С – данные с придонных датчиков (0.6 м) трех термокос, пунктирные линии – начало повышения температуры в левой части графика, в правой – ее понижения; (б) – градиент температуры от времени для придонного датчика термокосы В.

пространственно-временной изменчивости температуры вод шельфа, а также для изучения физических механизмов формирования этой изменчивости.

Непрерывные и круглогодичные высокочастотные измерения вертикальных профилей температуры позволяют детализировать закономерности развития неполного и полного прибрежного апвеллинга, а также их релаксацию [10].

Одним из результатов данной работы является демонстрация сложной структуры сезонного термоклина, в особенности, в весенний сезон года, когда происходит его формирование. Использо-

ваны различные методы графического представления данных измерений. Показана чрезвычайно высокая скорость трансформации термоклина, обусловленная процессами турбулентного перемешивания, апвеллингами и даунвеллингами, внутренними волнами и термическими фронтами.

Другим результатом является расчет амплитуды, скорости и направления распространения внутренних волн и термических фронтов по данным измерения кластера термокос. Данная методика позволит впоследствии получить репрезентативные оценки характеристик короткопериодных внутренних волн и термических фронтов на

северокавказском черноморском шельфе, а также изучить порождающие их механизмы.

Источники финансирования. Работа выполнена частично в рамках темы Госбюджета № 0149-2019-0004. Натурные измерения выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00381, обработка и анализ данных – при поддержке гранта РФФИ № 19-45-230002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. К.: Наукова думка, 1992. 244 с.
2. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2014. № 1. С. 16–29.
3. Очередник В.В., Баранов В.В., Зацепин А.Г., Куклев С.Б. Термокосы ЮО ИО РАН: конструкция, методика и результаты метрологического исследования датчиков // Океанология. 2018. Т. 58. № 5. С. 719–730.
4. Очередник В.В., Запевалов А.С., Баранов В.И. и др. Результаты постановки кластера заякоренных цепочек температурных датчиков (термокос) // Сб. трудов Международного симпозиума “Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере” МПС-2018. М.: ИО РАН, 2018. С. 265–267.
5. Очередник В.В., Запевалов 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.
6. Очередник В.В., Запевалов А.С. Определение скорости распространения волновых возмущений в двухкомпонентном поле // Процессы в геосредах. 2018. № 3. С. 1–8.
7. 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.
8. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. “Горячие точки” в поле внутренних волн в океане // Акустический журнал. 2007. Т. 53. № 3. С. 410–436.
9. 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.
10. 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.
11. Сильвестрова К.П., Очередник В.В. Изучение пространственных особенностей процессов апвеллинга и даунвеллинга на Черноморском гидрофизическом полигоне ИО РАН по данным заякоренных термокос // Материалы молодежной научной конференции. Морские исследования и рациональное природопользование. 2018. С. 165.
12. H. van Haren A fast and accurate thermistor string // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2001. V. 18. № 2. P. 256–265. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0256:AF-AATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0256:AF-AATS>2.0.CO;2)
13. Lamb K.W. Internal Wave Breaking and Dissipation Mechanisms on the Continental Slope/Shelf // Annual Review of Fluid Mechanics. 2014. V. 46. P. 231–254.
14. Mityagina M., Lavrova O. Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution In The Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2016. V. 8. № 10. P. 875.
15. Serebryany A. Internal waves on a shelf // Hydroacoustics. 2014. V. 17. P. 187–198.

Examples of Studying the Temperature Variability of the Black Sea Shelf Waters Using a Thermochains Cluster

V. V. Ocherednik^a, A. G. Zatsepin^{a, b, #}, S. B. Kuklev^a, V. I. Baranov^a, V. V. Mashura^a

^aShirshov Institute of Oceanology Russian academy of sciences, Moscow, Russia

^bMoscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

[#]e-mail: zatsepin@ocean.ru

A technique for studying the spatiotemporal variabilities of the temperature of the aquatic environment of the Black Sea shelf zone using a cluster of anchored of temperature sensors chains (thermochains) is described. Consisting of three spaced-apart thermochains, this cluster is employed in the inner shelf of the north-eastern part of the Black Sea and act as part of the “Gelendzhik” Suit (SIO RAS). This cluster allows to efficiently record the short-period spatiotemporal variabilities of the temperature. The quantitative characteristics of these variabilities, as well as the external factors determining it, one of which are internal waves, were established. The temperature variability allows to determine the amplitude of the fluctuations, and the registration of these ones on the thermochains – to assess the speed and direction of internal waves. Some examples of registration of short-period internal wave trains are given. Using various visualization methods the temporal variability of the vertical temperature distribution is shown.

Keywords: Black Sea, shelf zone, water temperature, spatio-temporal variability, internal waves, fronts, cluster of anchored chains of temperature sensors