

ОПЫТ ОДНОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ И ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОД С БОРТА ДВИЖУЩЕГОСЯ СУДНА

© 2021 г. С. Б. Куклев^{1, *}, А. Г. Зацепин¹, В. Т. Пака¹, В. И. Баранов¹, О. Н. Куклева¹, О. И. Подымов¹, А. П. Подуфалов¹, А. О. Корж¹, А. А. Кондрашов¹, Д. М. Соловьев²

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

²Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*e-mail: kuklev@ocean.ru

Поступила в редакцию 16.06.2020 г.

После доработки 05.07.2020 г.

Принята к публикации 15.08.2020 г.

На черноморском Полигоне “Геленджик” ИО РАН освоена методика совместных измерений профилей скорости течения с помощью буксируемого ADCP и гидрологической структуры путем периодических STD-зондирований на ходу судна (МНИС “Ашамба”) с высоким пространственно-временным разрешением. При этом STD-зондирования проводятся от поверхности моря до его придонного слоя по оригинальной методике, предложенной недавно В.Т. Пакой и опробованной им и его сотрудниками на Балтийском море. Важность проведения одновременных измерений такого рода обусловлена, с одной стороны, недостаточной изученностью влияния субмезомасштабных вихрей на гидрологическую структуру и процессы вертикального перемешивания. С другой стороны, перспективный аспект быстрых совместных ADCP- и STD-съемок на ходу судна связан с тем, что в ходе измерений их данные в режиме реального времени могут автоматически записываться на судовой сервер. Его коммутация с передающим устройством позволяет оперативно транслировать данные измерений в береговой центр сбора информации и далее ассимилировать их в математические модели, осуществляющие диагностические и прогностические расчеты состояния морской среды. Таким образом, освоенный метод проведения измерений в перспективе может рассматриваться как одно из средств оперативной океанографии, развитие которой является одной из основных задач, решаемых на черноморском Полигоне “Геленджик” ИО РАН.

Ключевые слова: Черное море, шельфово-склоновая зона, гидрологическая структура, структура течений, синхронные измерения на ходу судна

DOI: 10.31857/S0030157421010111

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных результатов исследований динамики вод шельфа и верхней части континентального склона с высоким пространственно-временным разрешением с помощью буксируемого за судном акустического доплеровского профилографа течения (ADCP-съемка) на черноморском Полигоне “Геленджик” ИО РАН [6, 8] было обнаружение субмезомасштабных вихрей как циклонического, так и антициклонического знаков [7]. Оказалось, что эти вихри с диаметром 2–10 км и орбитальной скоростью 20–50 см/с являются доминирующими динамическими структурами шельфовой зоны и оказывают значительное влияние на кросшельфовый водообмен и перенос загрязнений. Их формирование происходит под влиянием Основного черноморского течения и связанных с ним мезомасштабных вих-

рей [1, 2, 10], а также под влиянием пространственно-неоднородного северо-восточного ветра [4, 9].

Вместе с тем, до сих пор является малоисследованным влияние субмезомасштабных вихрей на гидрологическую структуру шельфа и верхней части континентального склона, а также процессы вертикального перемешивания, хотя есть свидетельства того, что в ядрах развивающихся субмезомасштабных циклонов происходит апвеллинг, способствующий выходу термоклинных вод на поверхность моря [5, 12]. Для исследования этого влияния целесообразно дополнить судовые ADCP-съемки синхронными STD-зондированиями на ходу судна. Такого рода зондированиями на протяжении ряда лет занимаются сотрудники АО ИО РАН под руководством В.Т. Паки. Ими, в частности, недавно разработан метод

зондирования от поверхности практически до дна моря с движущегося судна, безопасный с точки зрения сохранности STD-зонда. Этот метод был успешно применен в нескольких судовых рейсах на Балтийском море [11].

В сентябре 2019 г. данный метод был использован при проведении совместной ADCP- и STD-съемки акватории Полигона “Геленджик” ИО РАН. Одной из задач данной статьи является методическое описание данной съемки, представление ее результатов и их обсуждение. Другой задачей является обозначение перспективы использования быстрых совместных ADCP- и STD-съемок с высоким пространственно-временным разрешением на ходу судна для нужд оперативной океанографии. В этой перспективе получаемые данные в режиме реального времени должны записываться на судовой сервер (например, полевой ноутбук). Его коммутация с передающим устройством позволяет оперативно транслировать данные измерений в береговой центр приема и обработки данных и далее ассимилировать их в математические модели, осуществляющие диагностические и прогностические расчеты. Таким образом, данный метод проведения измерений в перспективе может рассматриваться как одно из средств оперативной океанографии, развитие которой является одной из основных задач, решаемых на черноморском Полигоне “Геленджик” ИО РАН.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методике и результатам исследования пространственной структуры течения на Полигоне “Геленджик” ИО РАН с помощью буксируемого ADCP посвящено много научных статей [1, 3, 6], а также раздел в коллективной монографии [11]. В данной статье мы не будем ее описывать, отсылая читателей к вышеуказанным источникам. Отметим лишь одну особенность – буксировка ADCP осуществляется в гондоле обтекаемой формы, способ крепления которой к буксировочному кабель-тросу приводит к ее движению вне кильватерной струи судна. Таким образом, измерения профилей скорости течения проводятся вне кильватерного следа, а пространство за кормой судна остается свободным, что и позволяет беспрепятственно осуществлять периодические STD-зондирования на ходу судна, одновременно с измерением профилей скорости течения буксируемым ADCP. Все это было реализовано в описываемом эксперименте.

Съемка термохалинной структуры выполнялась по новой методике измерений на ходу судна, рассчитанной на использование стандартных мультипараметрических зондов типа STD48Mc фирмы Sea&Sun Technology, OS 310 фирмы Idropaut и других, им конструктивно подобных и об-

ладающих необходимым набором датчиков и достаточно большой частотой опроса около 20 Гц.

Зондирование STD-зондом Sea&Sun 48Mc на ходу судна проводилось по методике, разработанной в 2018–2019 гг. [11]. Только эта методика позволяет зондировать практически до дна моря без риска повреждения и потери зонда. Прежняя методика зондирования на ходу судна базировалась на использовании зонда, буксируемого на кабель-тросе с непрерывным периодическим изменением заглубления (майна–вира) с помощью достаточно мощной и быстрой лебедки. При этом приближение быстро движущегося зонда ко дну было сопряжено с риском потери прибора. Поэтому зондирование, как правило, не доводилось до дна.

Новая методика основана на обеспечении свободного падения зонда на длинном фале с концевым грузом по вертикальной траектории. Рисунок 1 поясняет данную методику зондирований.

Будучи сброшенным за борт, зонд тонет, увлекая за собой фал. При этом обеспечивается свободный выпуск фала, для чего он наматывается при выборке на легкую вьюшку. Зонд должен долететь до дна, при этом его скорость должна быть близкой к рекомендованной с учетом динамических характеристик датчика, в нашем случае – 1.5–1.0 м/с. В этом режиме фал должен выпускаться с судна со скоростью, равной сумме скорости падения зонда и скорости хода судна. Соответственно, требуется достаточно большой запас фала L , который определяется с учетом глубины зондирования H , скорости заглубления зонда V и скорости хода судна U : $L = H/V(U + V)$. В нашем распоряжении было около 500 м фала, что позволяло зондировать до глубины 150 м при скорости судна не более 5 узлов.

Для выборки зонда необходимо усилие около 30 кГ, обеспечиваемое механизмом, действующим по принципу кабестана в варианте, используемом на рыболовных судах при ярусном лове для выборки фала. Тяговое усилие создает диск с V-образной канавкой, приводимый во вращение мотором мощностью около 0.5 кВт (рис. 26). На выходе с диска используются еще два ролика – прижимной, ось которого закреплена на подпружиненном рычаге, и выходной, имеющий неподвижную ось. Прижимной ролик необходим, чтобы при вращении диска фал не выпадал из канавки, а выходной ролик необходим для того, чтобы подматывающая вьюшка, создающая натяжение фала на выходе с тянувшего диска, не отжимала прижимной ролик, так как в противном случае он не будет действовать, и диск начнет проворачиваться в петле фала, что недопустимо.

Тянувший диск был доставлен из Калининграда, а подматывающая вьюшка оперативно изготовлена в ЮО ИОРАН. Монтаж всего оборудова-

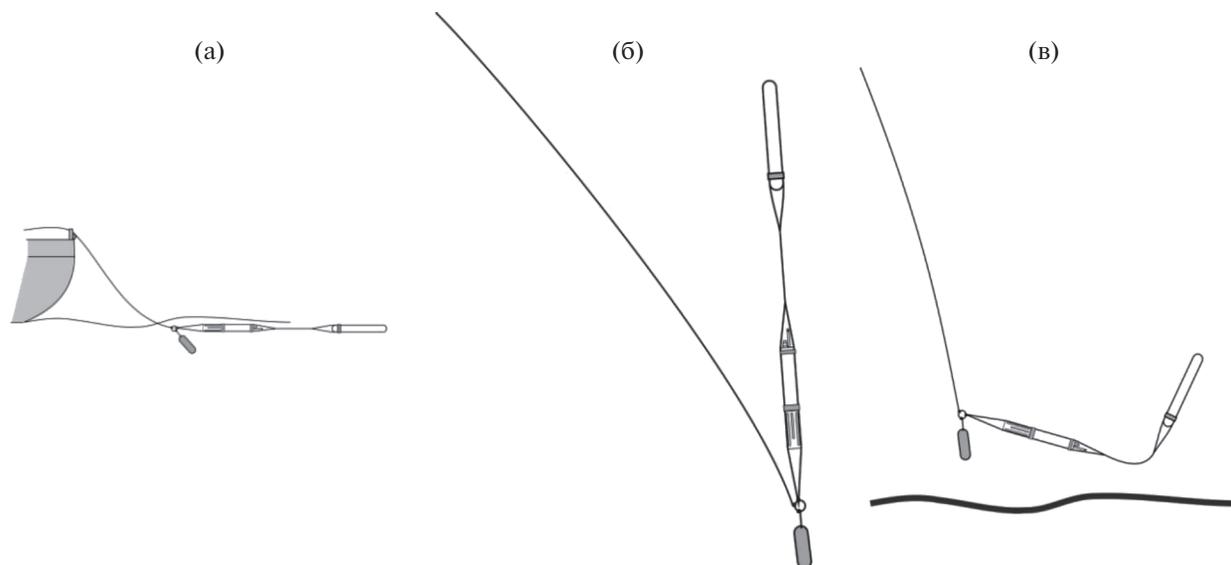


Рис. 1. Принцип организации измерений на ходу судна стандартным мультипараметрическим зондом: а) начало/конец зондирования; б) свободное падение до дна; в) начало подъема.

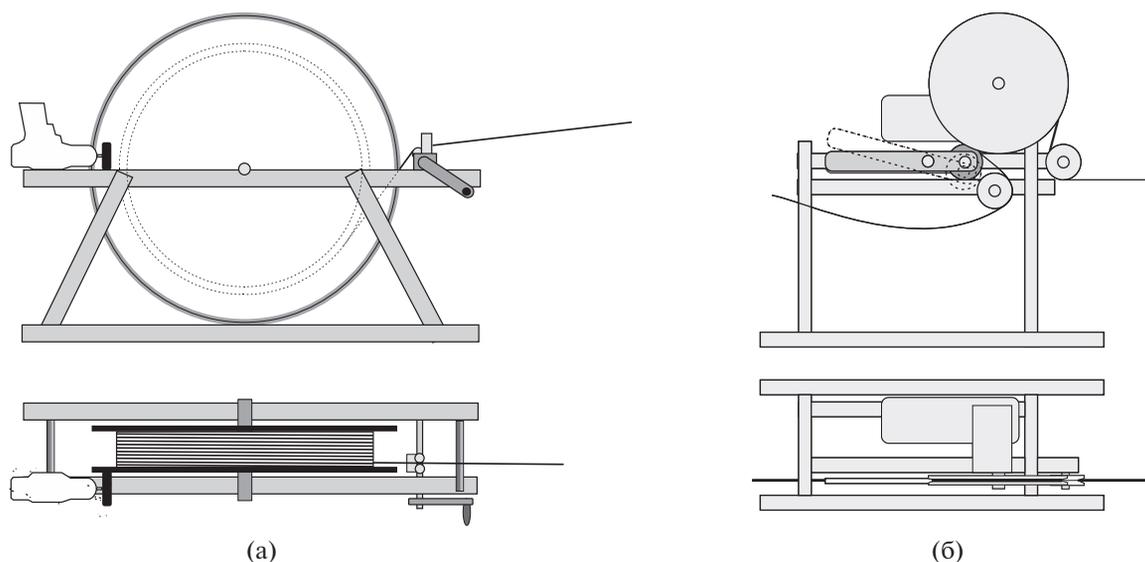


Рис. 2. Подматывающая вьюшка (а) со свободным ходом и электроприводом на базе шурупверта с резиновым роликом, прижимаемым к щеке вьюшки, и тянущий механизм (б), имеющий тянущий диск с V-образной канавкой, в которую закладывается выбираемый фал. Фал заводится на тянущий диск через направляющий ролик, охватывая диск по дуге около 300° , на выходе с диска используется еще два ролика – прижимной и выходной, назначение которых поясняется в тексте.

ния на МНИС “Ашамба” занял небольшое количество времени.

Оснащение зонда (рис. 3) предусматривает его ориентацию навстречу набегающему потоку, как при погружении, так и при всплытии, и безопасное достижение придонного слоя, где зонд, не касаясь дна, зависает на расстоянии около 40 см от дна. К зонду с помощью тонкого фала подвезан снизу свинцовый груз, сверху – поплавок, сб-

лансированные таким образом, чтобы вся связка тонула со средней скоростью 1.5 м/с в начале погружения и 1.0 м/с в его конце. Постепенное уменьшение скорости падения зонда связано с его торможением из-за того, что зонд увлекает за собой фал с поверхности моря и при этом длина фала постоянно растет. Фал крепится к связке между зондом и грузом, что и обеспечивает вертикальную ориентацию зонда при его погружении и выборке (рис. 1б).

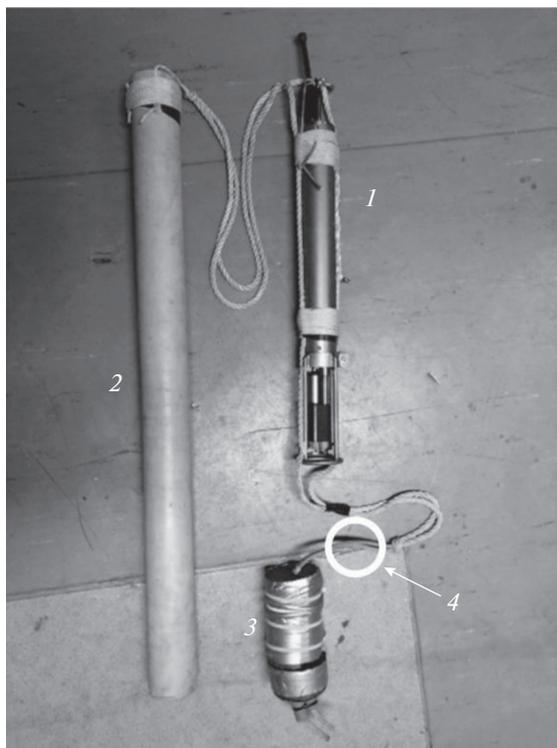


Рис. 3. Оснастка зонда Sea&Sun 48Mc: 1 – зонд, 2 – поплавок, 3 – свинцовый груз, 4 – точка крепления фала.

Подматывающая вьюшка и тянущий механизм свободно размещались вдоль борта МНИС “Ашамба” на кормовой палубе и обслуживались группой из трех человек.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для реализации описанной выше методики одновременных измерений профилей скорости течения и гидрологической структуры на Полигоне “Геленджик” было организовано два выхода МНИС “Ашамба” 14 и 16 сентября 2019 г. В эксперименте 14 сентября 2019 г. профилограф течений ADCPWH 600 буксировался за судном в гондоле, в эксперименте 16 сентября 2019 г. – был апробирован вариант его установки в шахте судна. Однако этот вариант оказался не вполне удачным. В данных измерений было большое количество сбойных и некорректных данных, по которым восстановление поля скорости течения оказалось невозможным. Очевидно, что причины неудачи с установкой ADCP в шахте МНИС “Ашамба” нуждаются в исследовании. В настоящей статье представлены только результаты съемки, выполненной 14 сентября 2019 г. с использованием ADCP в гондоле, буксируемой за

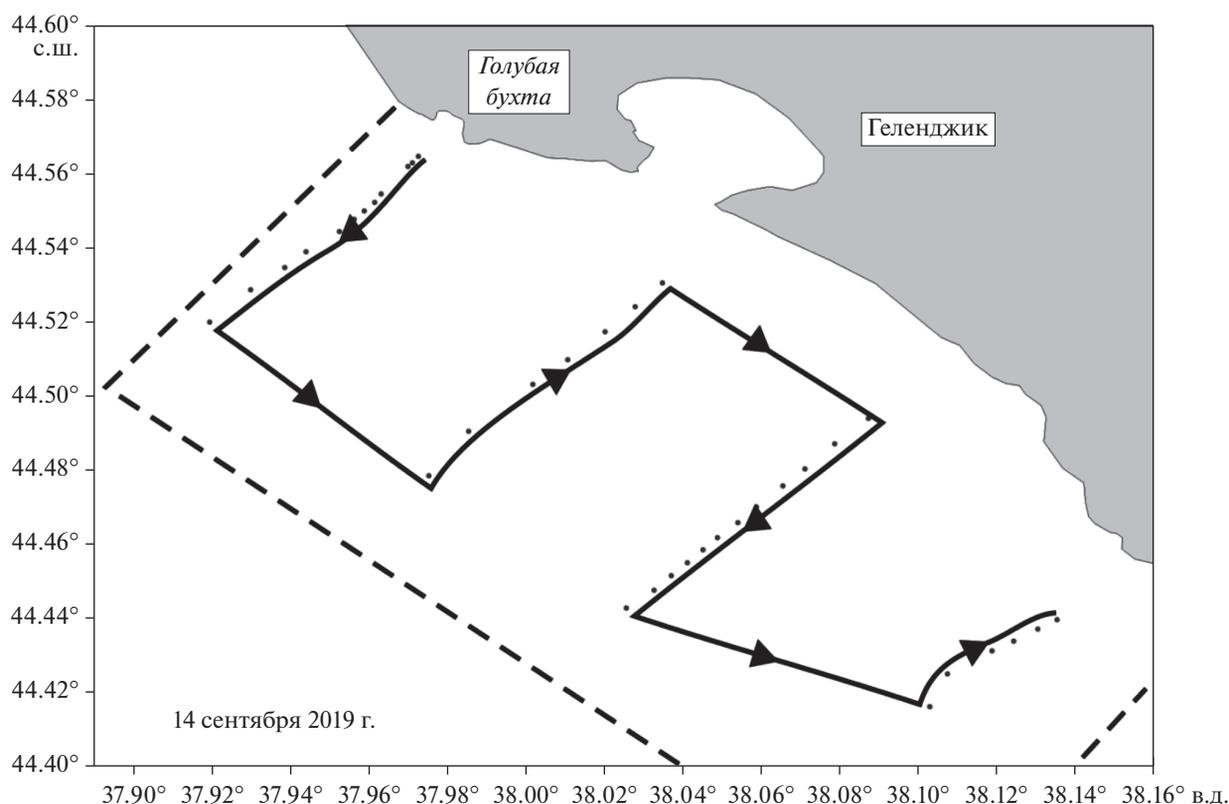


Рис. 4. Схема галсов судна во время проведения одновременных STD- и ADCP-съемок акватории Полигона “Геленджик” 14 сентября 2019 г. Сплошной линией со стрелками обозначена траектория движения судна (галсы буксировки ADCPWH 600), стрелки – направления движения судна, серые точки – станции STD-зондирования. Пунктирными отрезками показаны условные границы Полигона “Геленджик” ИО РАН.

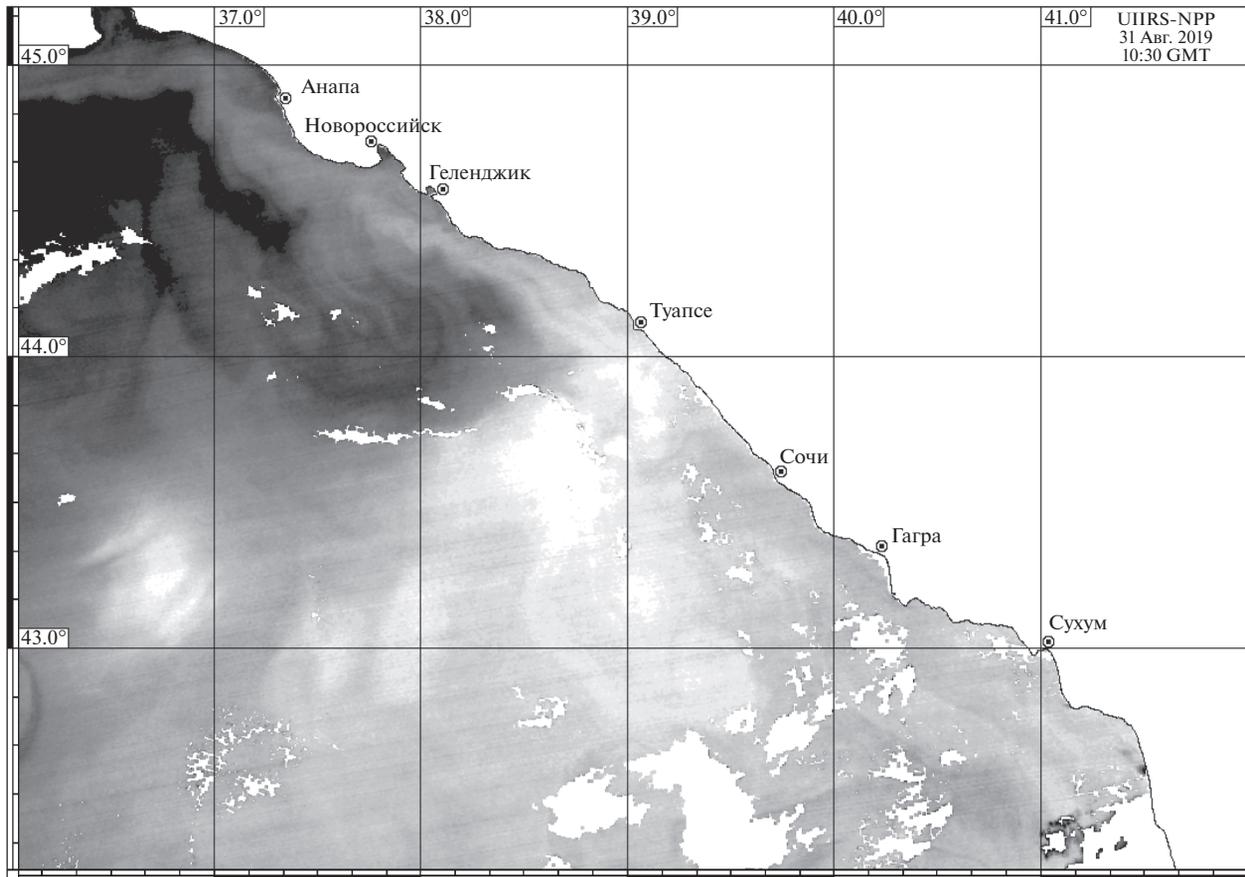


Рис. 5. Процесс развития вдольберегового течения в северо-восточной части Черного моря, проявившийся в поле ТПМ (31.08.2019 г., VIIRS-NPP).

судном. Схема галсов судна во время проведения съемки приведена на рис. 4.

Проведению съемок предшествовал ежедневный сбор спутниковой информации (спутники MODIS-AQUA, VIIRS-NPP, Sentinel-3A). В общей сложности было получено 82 космических снимка в период с 25 августа по 16 сентября 2019 г. Анализ спутниковой информации показал, что обе съемки проводились в условиях сильного прибрежного течения северо-западного направления. Опираясь на опыт анализа результатов ранее выполненных подспутниковых экспериментов [4], можно утверждать, что по своей природе это было градиентное течение, которое сформировалось в районе г. Туапсе как результат пространственно-неоднородного ветрового воздействия. В третьей декаде августа преобладал ветер северо-восточного направления (норд-ост), воздействие которого привело к сгону теплых поверхностных вод и понижению уровня моря на протяженном участке от Туапсе до Керченского пролива. При этом воды более южного участка прибрежной зоны Черного моря, защищенные от норд-оста горами северо-кавказского хребта,

оставались теплыми и характеризовались более высоким уровнем морской поверхности. После ослабления норд-оста на фронте, разделяющем более холодные и теплые воды, в районе г. Туапсе сформировалось прибрежное градиентное течение северо-западного направления. Механизм формирования теплого вдольберегового течения был подробно описан в работе [4]. Развитие прибрежного течения хорошо видно на снимке VIIRS-NPP в поле температуры поверхности воды (ТПМ) на спутниковом снимке от 31 августа 2019 г., представленном на рис. 5. Из этого снимка следует, что часть теплых вод уже достигла Керченского пролива. При этом основная масса теплых вод (светлая градация) расположена южнее Туапсе.

При взаимодействии течения с берегом, который в орографическом отношении является неоднородным, время от времени формируются субмезомасштабные вихревые структуры. В районе Полигона "Геленджик", на котором выполнялись исследования, такими особенностями являются мыс Идокопас, Геленджикская и Голубая бухты. В период с конца августа по 14 сентября

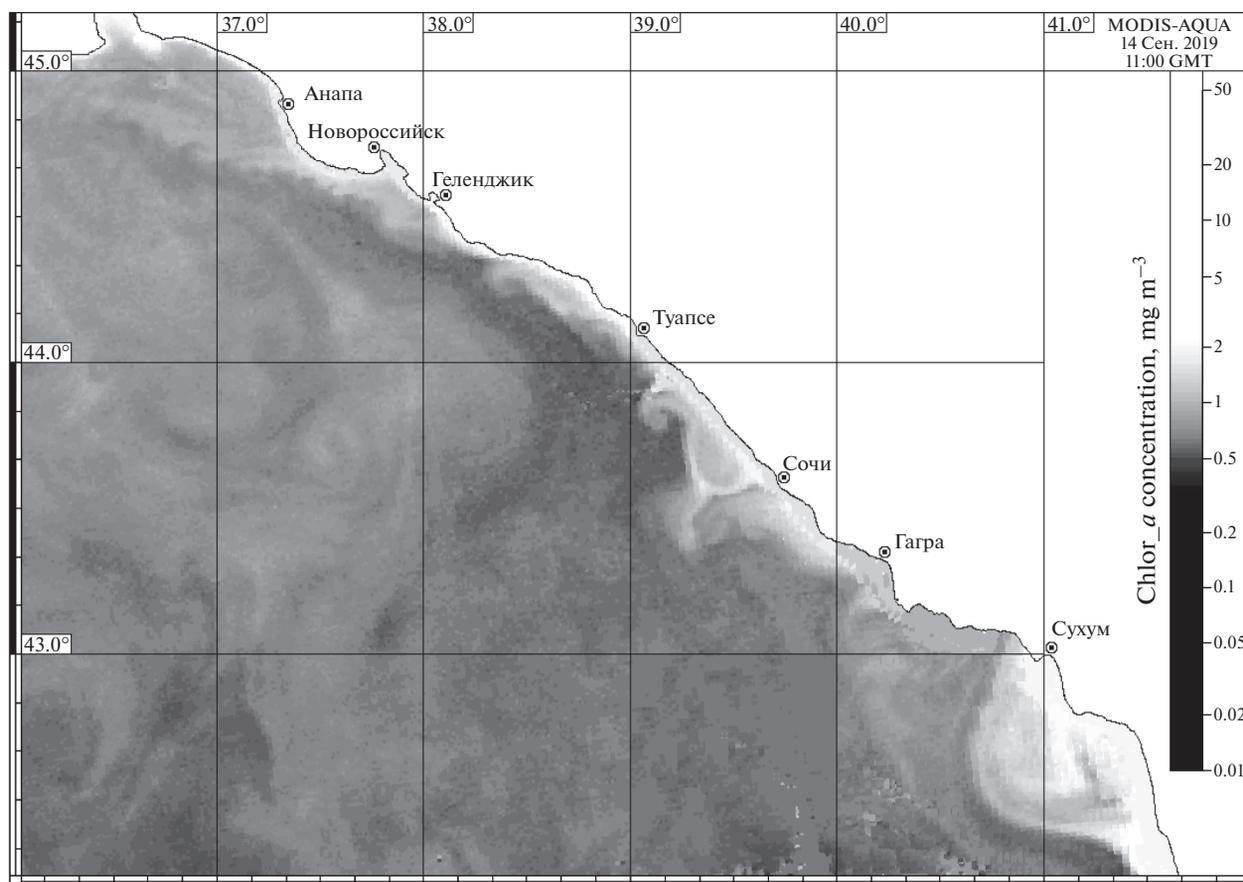


Рис. 6. Развитие вдольберегового течения с субмезомасштабными вихревыми структурами, наблюдаемое на спутниковом снимке в поле хлорофилла-*a* (14.09.2019 г., MODIS-AQUA).

при обтекании течением мыса Идокопас наблюдался квазипериодический процесс развития вихрей различного знака, формирование цепочек вихрей, которые перемещались преимущественно на северо-запад и пересекали акваторию Полигона (рис. 6). В конце этого периода, 14 сентября, структура течений на акватории Полигона находилась под влиянием двух субмезомасштабных вихрей: достаточно большого (с диаметром порядка 10 км) антициклонического в северо-западной части Полигона и циклонического вихря меньшего размера в его юго-восточной части. Не исключено, что циклонический вихрь образовался вследствие сдвиговой неустойчивости течения на периферии антициклонического вихря. Между этими вихрями наблюдалось струйное течение, направленное преимущественно от берега. В глубоководной части моря оно разворачивалось на северо-запад. Идентифицировать данную динамическую структуру позволила съемка поля скорости течения, выполненная с помощью буксируемого за судном ADCP.

Результаты съемки показаны на рис. 7. На этом рисунке представлены осредненные в верхнем

30-метровом слое данные о скорости течения. Осреднение проводилось по всей толщине верхнего квазиоднородного слоя, толщина которого составляла около 30 м. Субмезомасштабные антициклонический и циклонический вихри обозначены АВ и ЦВ соответственно. Также на рис. 7а и 7б нанесены изотермы на горизонтах 5 и 32 м соответственно, построенные по результатам STD-зондирований. Полученный графический материал позволяет выявить особенности вертикального/горизонтального распределения измеренных параметров в зависимости от глубины, а также оценить влияние динамики вод на гидрологическую структуру, представленную в поле температуры.

Из полученных результатов следует, что субмезомасштабная динамика вод существенно влияла на распределение температуры воды на различных горизонтах. В частности, на рис. 7а видно, что изотермы на горизонте 5 м, расположенном в верхнем квазиоднородном слое, вытянуты в направлении струйного течения между вихрями. На рис. 7б, где изображены изотермы, относящиеся к верхней части термоклина, видно, что тер-

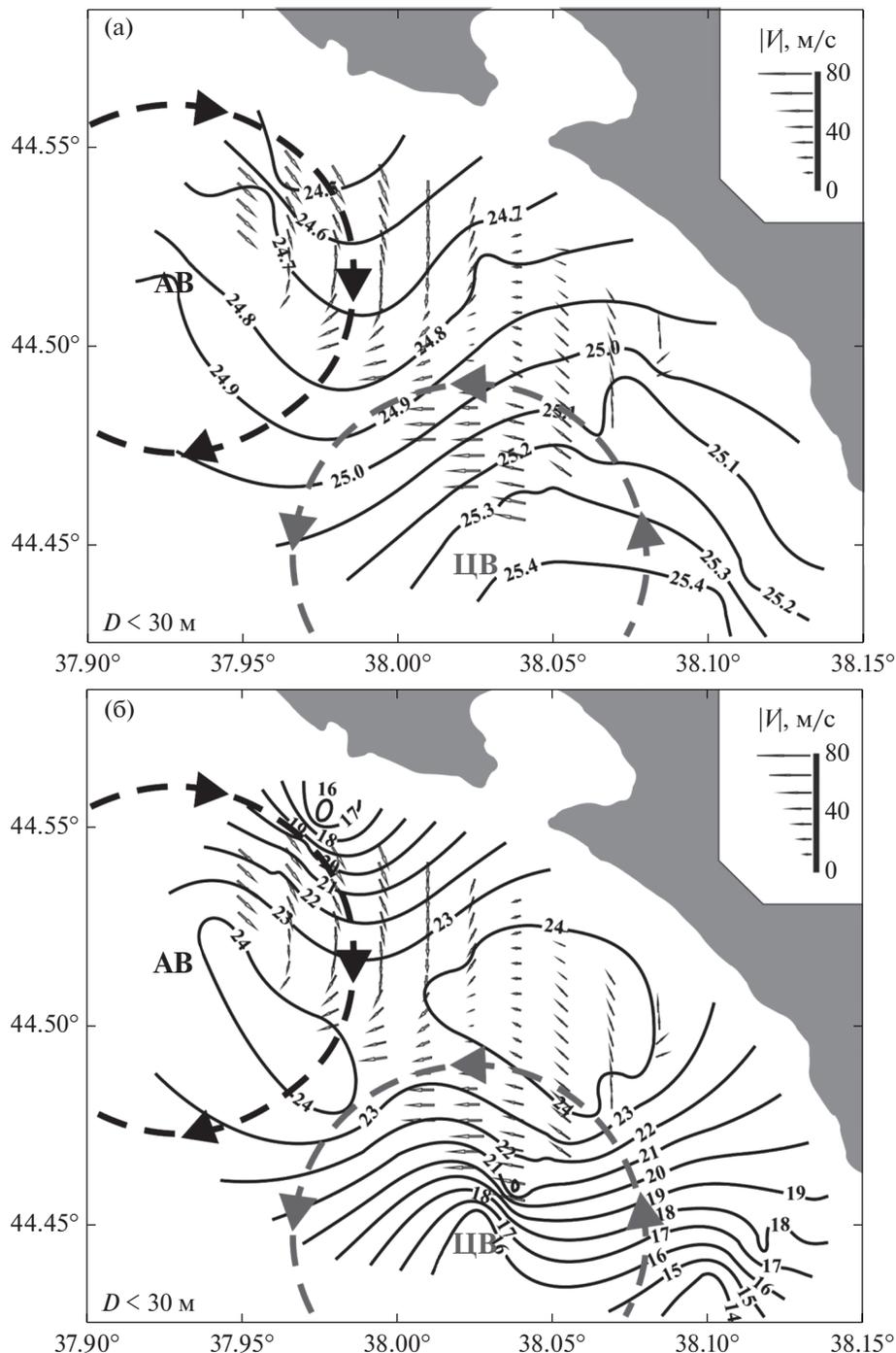


Рис. 7. Совместное представление векторов скорости течения (стрелки), осредненных в верхнем 30-метровом слое моря, а также изотерм на глубине: а) 5 м, б) 32 м (по данным совместной CTD- и ADCP-съемки 14 сентября 2019 г.). На рисунках “ $D < 30$ м” означает осреднение течений для верхнего 30-ти метрового слоя.

моклин слегка приподнят в области циклонического вихря и опущен в области антициклона. При этом диапазон изменчивости температуры на горизонте 32 м приблизительно на порядок больше, чем на горизонте 5 м. Большая изменчивость температуры на горизонте 32 м связана с сильным вертикальным градиентом температуры

в термоклин. Даже его небольшое опускание или подъем в пределах нескольких метров приводит к изменению температуры на этом горизонте, достигающем 8°C .

Очевидно, что вертикальные движения воды в области субмезомасштабных вихрей должны оказывать влияние на фитопланктонные сообщества

и на распределение хлорофилла. Поэтому в дальнейшем при проведении зондирований на ходу судна планируется использовать STD-зонд, доукомплектованный датчиком флуоресценции.

ВЫВОДЫ

В сентябре 2019 г. на акватории Полигона опробована методика совместной съемки поля течения и гидрологической структуры с высоким пространственно-временным разрешением с помощью буксируемого ADCP и периодического STD-зондирования на ходу судна (МНИС “Ашамба”). Возможность одновременного использования двух различных приборных комплексов обусловлена особенностью крепления троса сбоку к гондоле обтекаемой формы с ADCP. Благодаря этому гондола при буксировке уходит в сторону от кильватерной струи. Пространство за кормой судна остается свободным, что и позволяет беспрепятственно осуществлять периодические STD-зондирования по методике, впервые предложенной В.Т. Пакой и уже использовавшейся ранее в Балтийском море [11].

Совместная ADCP- и STD-съемка показала существенное влияние динамики вод на гидрологическую структуру в субмезомасштабном диапазоне пространственной изменчивости. Так, вихревая пара, состоящая из двух субмезомасштабных вихрей, “вытянула” изотермы в верхнем перемешанном слое вдоль “ножки” вихревого диполя, расположенной почти перпендикулярно берегу. В ядре циклонического вихря наблюдался подъем термоклина, тогда как в антициклоническом вихре термоклин был опущен.

В 2020–2021 гг. на акватории Полигона планируется продолжить проведение совместных ADCP- и STD-съемок с субмезомасштабным пространственным разрешением на ходу судна. При этом планируется размещение ADCP в шахте МНИС “Ашамба”. Также планируется проведение периодических зондирований STD-зондом на кабельтросе. Это позволит регистрировать данные измерений и с STD, и с ADCP в режиме реального времени и, при организации средств связи, оперативно передавать их в береговой центр сбора и обработки данных. Описанная технология совместных съемок рассматривается как элемент оперативной океанографии, развитие средств и методов которой является одной из задач, решаемых на Полигоне “Геленджик” ИО РАН.

Источник финансирования: Работа выполнена в рамках государственного задания (темы №№ 0149-2019-0014, 0149-2019-0004) и грантов РФФИ (№№ 20-05-00496, 19-45-230002, 19-05-00962).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А. и др.* Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
2. *Зацепин А.Г., Ёлкин Д.Н., Корж А.О. и др.* О влиянии изменчивости течения в глубоководной зоне Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа // *Морской гидрофизический журн.* 2016. № 3. С. 16–25.
3. *Зацепин А.Г., Корж А.О., Кременецкий В.В. и др.* Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Черного моря с использованием традиционных и новых методов измерений // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 4. С. 510–519.
4. *Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Пиотух В.Б. и др.* Формирование прибрежного течения в Черном море из-за пространственно-неоднородного ветрового воздействия на верхний квазиоднородный слой // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 2. С. 176–192.
5. *Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др.* О природе короткопериодических колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г. // *Изв. РАН. ФАО*. 2013. № 6. С. 717–732.
6. *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. ФАО*. 2014. Т. 50. № 1. С. 16–29.
7. *Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О. и др.* Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 5. С. 629–642.
8. Некоторые результаты комплексной прибрежной экспедиции “Черное море – 2017” на МНИС “Ашамба” (отв. редакторы Зацепин А.Г., Куклев С.Б.). М.: Научный мир, 2018. 172 с.
9. *Elkin D.N., Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V., Nizov S.S.* Laboratory Study of the Generation Mechanism of Coastal Eddies in the Black Sea due to the Spatially Non-Uniform Wind Impact // *Fluxes and structures in fluids. Selected Conference Papers*. 2010. P. 117–121.
10. *Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Soloviev D.M., Stanichny S.V.* Remotely sensed coastal/deep-basin water exchange processes in the Black Sea surface layer // *Satellites. Oceanography and Society*. Ed. Halpern D. Elsevier Oceanogr. Ser. 2000. № 63. P. 273–287.
11. *Paka V., Zhurbas V., Golenko M. et al.* Innovative Closely Spaced Profiling and Current Velocity Measurements in the Southern Baltic Sea in 2016–2018 with Special Reference to the Bottom Layer // *Frontiers in Earth Science*. May 2019. V. 7. Article 111. P. 1–18.
12. *Zatsepin A., Kubryakov A., Aleskerova A. et al.* Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea // *Ocean Dynamics*. 2019. № 69. P. 253–266.

Experience of Simultaneous Measurements of Parameters of Currents and Hydrological Structure of Water from a Moving Vessel

S. B. Kuklev^{a, #}, A. G. Zatsepin^a, V. T. Paka^a, V. I. Baranov^a, O. N. Kukleva^a, O. I. Podymov^a,
A. P. Podufalov^a, A. O. Korg^a, A. A. Kondrashov^a, D. M. Soloviev^b

^a*Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia*

^b*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

[#]*e-mail: kuklev@ocean.ru*

At the Black Sea Research Site “Gelendzhik” of IO RAS, a technique has been installed for joint measurements of current velocity profiles using towed ADCP and by periodic CTD soundings from board of the mini R/V (“Ashamba”) with high spatial-temporal resolution. In this case, CTD soundings are made from the surface of the sea to its bottom layer according to the original method recently proposed by V.T. Paka and tested by him and his colleagues on the Baltic Sea. The importance of carrying out simultaneous measurements of this kind is due to the insufficient knowledge of the effect of submesoscale eddies on the hydrological structure and vertical mixing processes. On the other hand, a promising aspect of fast joint ADCP and CTD surveys from mothing R/V is that their measurements can be automatically recorded on the ship’s server in real time. Its connection to the transmitting device allows to transmit measurement data to the coastal data center and to assimilate them into numerical models that perform now cast and hind cast calculations of the marine environment state. Thus, in the future, this technique can be considered as one of the means of operational oceanography, the development of which is one of the main tasks solved at the Black Sea Research Site “Gelendzhik” of IO RAS.

Keywords: Black Sea, shelf-slopezone, hydrological structure, current structure, joint measurements from moving R/V