

ИЗУЧЕНИЕ МЕЗО- И СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ШЕЛЬФЕ И КОНТИНЕНТАЛЬНОМ СКЛОНЕ ДИСТАНЦИОННЫМИ И КОНТАКТНЫМИ МЕТОДАМИ

Зацепин А.Г.¹, Куклев С.Б.¹, Мысленков С.А.^{1 2 3},
Очередник В.В.¹, Подымов О.И.¹, Сильвестрова К.П.¹

Анализ данных долгопериодных квазинепрерывных измерений скорости течений, выполненных с помощью донных станций ADCP на черноморском полигоне ИО РАН «Геленджик» (см. сайт: <http://polygon.ocean.ru/>, а также Зацепин и др., 2014) показал, что значительную часть времени вдольбереговые течения в шельфовой зоне Черного моря носят осциллирующий характер с характерными периодами колебаний от нескольких часов до нескольких суток (Зацепин и др., 2012). Одна из причин выявленного феномена заключается в том, что вблизи берега на шельфе значительную часть времени присутствуют субмезомасштабные шельфовые вихри – как циклонические, так и антициклонические, диаметр которых изменяется в пределах первого десятка километров (Зацепин и др., 2011). Скорость орбитального вихревого движения может достигать 30–50 см/с, а время жизни вихрей – от нескольких часов до несколько суток. Исследования показали, что субмезомасштабные вихри оказывают существенное влияние на процессы трансшельфового обмена в Черном море, на процессы распространения загрязнений на морском шельфе, поступающих в основном с берега с речным стоком или из Азовского моря (Завьялов и др., 2014; Ижицкий, Завьялов, 2017).

Изучение субмезомасштабной вихревой динамики и связанных с ней явлений является важной научной и практической проблемой, которая решается путем проведения систематических инструментальных исследований и анализа спутниковой информации на черноморском полигоне ИО РАН в шельфово-склоновой зоне моря в районе

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

³ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия
E-mail: zatsepin@ocean.ru

г. Геленджик, а также методами лабораторного (Елкин, Зацепин, 2013, 2014) и численного моделирования (Дивинский и др., 2015; 2017; Куклев и др., 2017). По результатам предшествующих исследований предложен и обоснован сценарий образования цепочек субмезомасштабных вихрей на узком шельфе под влиянием меандрирования Основного черноморского течения (ОЧТ). Эти вихри, как циклонические, так и антициклонические, зачастую имеют угловую скорость по модулю, превышающую параметр Кориолиса ($|Ro| = |\omega|/f > 1$, Ro – число Россби, ω – локальная завихренность поля скорости течения, f – параметр Кориолиса), а их радиус – меньше значения бароклинного радиуса деформации Россби на шельфе. Установлено, что при прижатом к континентальному склону ОЧТ на шельфе преимущественно образуются субмезомасштабные антициклоны, а при наличии над континентальным склоном мезомасштабного антициклонического вихря, или меандра ОЧТ, – цепочки субмезомасштабных циклонов. Поскольку характерный период меандрирования ОЧТ составляет около 10 суток, на протяжении одной половины этого периода на шельфе должны наблюдаться преимущественно антициклоны, а на протяжении другой половины периода – циклоны (Зацепин и др., 2012, 2016). Вместе с тем данная схема является рамочной и нуждается в дальнейшей проверке и уточнении с целью выработки количественных критериев формирования субмезомасштабных вихрей и их цепочек.

Для долговременного и синхронного измерения поля скорости течения на акватории полигона и за его пределами на протяжении последних нескольких лет проводились пробные эксперименты с доплеровским радиолокатором КВ-диапазона SeaSonde (фирма CODAR, США), владельцем которого является Крыловский государственный научный центр (КГНЦ). Результаты работы показали хорошую перспективу использования доплеровских КВ-радиолокаторов для мониторинга скорости поверхностного течения с субмезомасштабным пространственным разрешением (Зацепин и др., 2017). Вместе с тем выявились ограничения в репрезентативности получаемых радиолокационных данных, относящиеся к случаям слабых течений (скорость порядка или менее 10 см/с) а также при штилевой, или штормовой погоде. Исследования вопроса возможности использования КВ-радара SeaSonde и других радиолокационных систем для исследования субмезомасштабной динамики вод шельфа продолжаются.

На данном этапе экспедиции в 2017 г. решались следующие основные задачи.

1. Поддержание гидрофизического полигона автономных станций (профилограф «Аквалог» на заякоренной буйковой станции, заякоренные термокосы, донные станции ADCP, метеорологический буй) с целью получения квазинепрерывных рядов гидрофизических данных с высоким (субмезомасштабным) пространственно-временным разрешением.
2. Подготовка и проведение эксперимента с КВ-радаром SeaSonde, установленным в избранной точке побережья (пирс ЮО ИО РАН) с целью измерения характеристик

скорости и восстановления поля поверхностных течений на акватории гидрофизического полигона и мористее его (до 20 км от берега).

3. Проведение пространственных съемок поля скорости течения на акватории полигона с помощью буксируемого за судном ADCP, а также запуск лагранжевых дрейфтеров с определением и онлайн-передачей их географических координат с целью получения новых представлений о трехмерной структуре поля течений на акватории полигона с субмезомасштабным пространственным разрешением.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения задач этапа использовались следующие методы и средства наблюдений:

- 1) анализ текущей спутниковой информации в инфракрасном и видимом диапазонах спектра (температура и цвет морской воды);
- 2) пространственные съемки поля скорости течения с помощью буксируемого за судном ADCP, размещенного в обтекаемой гондоле (Зацепин и др., 2008, 2011);
- 3) долговременное (на протяжении многих месяцев) измерение профилей скорости течения и сигнала обратного акустического рассеяния с помощью донных станций с ADCP (Зацепин и др., 2012);
- 4) долговременное измерение вертикальных распределений температуры с помощью автономных заякоренных термокос, расположенных рядом с донными станциями ADCP;
- 5) долговременное измерение профилей температуры, солености, плотности воды, а также скорости течения и обратного акустического рассеяния с помощью автономного зонда-профилографа «Аквалог» на заякоренной буйковой станции (Ostrovskii, Zatsepin, 2011; Островский и др., 2013).

Анализ спутниковой информации производился с целью получения качественных представлений о структуре и интенсивности поверхностных течений в прибрежной и глубоководной частях моря, сопряженных с районом исследований, для интерпретации данных CTD-разрезов и пространственных съемок поля горизонтальной скорости течений, а также данных гидрофизических измерений с помощью автономного комплекса «Аквалог», термокос на заякоренных буйковых станциях и донных станций ADCP. Были проанализированы серии последовательных спутниковых изображений северо-восточной части Черного моря (ТПМ), принятых спекрорадиометрами MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ИСЗ Terra и Aqua в оптическом (хлорофилл, взвесь) и ИК (ТПМ) диапазонах электромагнитного спектра с пространственным разрешением 500 м, а также данные съемок высокого (до 30 метров) разрешения по поверхности со спутников серии Landsat, а именно оптические и ИК-изображения сенсо-

ра ТМ со спутника Landsat-5, сенсора ETM+ со спутника Landsat-7 и сенсоров OLI и TIRS со спутника Landsat-8.

Для оценки сопутствующих гидрометеорологических характеристик были использованы данные наблюдений метеостанции г. Геленджик, расположенной у входа в Геленджикскую бухту на Толстом мысу (44.55°с.ш., 38.05°в.д.). В стандартные метеорологические сроки (через 3 часа по Гринвичу) определяются: направление ветра и средние и максимальные величины скорости ветра (порывы); температура воздуха; температура воды (по срокам через 6 часов и среднесуточная); влажность (по срокам наблюдений и среднесуточная); уровень моря (по срокам через 6 часов); суточные осадки; атмосферное давление (по срокам наблюдений и среднесуточное); соленость воды (раз в сутки – в 15 часов).

Для получения квазимгновенных данных о трехмерном поле горизонтальной скорости течений в шельфовой зоне в настоящее время используется буксируемый за судном ADCP RDI WH-600 (600 кГц, фирмы RDI Teledyne Co., США). Профилограф, размещен-



РИС. 1.1.

Акустический доплеровский профилограф в гондоле перед началом (слева) и в момент (справа) буксировки

ный в специально изготовленной гондоле таким образом, чтобы ось прибора была направлена вертикально вниз, буксируется за судном на кабель-тросе (рис. 1.1).

За короткое время (5-8 часов) выполняется от 4 до 7 перпендикулярных берегу разрезов с расстоянием 2-4 км между ними. Репрезентативные измерения (с точностью 0.02-0.03 м/с) прибор производит только в режиме «bottom tracking», т.е. когда он принимает сигнал, отраженный от дна моря. Этот режим работы реализуется, если

расстояние между прибором и дном в случае использования ADCP WH-600 не превышает 100 м. Соответственно, надежные измерения поля скорости течения (с точностью 2-3 см/с) могли быть получены только в шельфовой зоне моря и над верхушкой континентального склона. Наряду с измерением течений, ADCP измеряет величину обратного рассеяния звука, которая пропорциональна концентрации звукорассеивающих частиц. Положение и интенсивность звукорассеивающих слоев характеризует не только гидрофизические, но и биологические условия и процессы, поскольку рассеивание звука происходит и на фито- и зоопланктоне. Профили горизонтальной скорости течения, полученные на разрезах, используются для восстановления пространственной структуры поля скорости течений.

Скорость течения на площадных картах представляется в векторном виде, позволяющем оценить не только пространственное распределение амплитуды скорости и ее направление, а также наличие вихревых структур на полигоне. Дополнительно рассчитываются и наносятся на карту цветом значения числа Россби:

$$Ro = w/f,$$

где f – параметр Кориолиса, w – локальная завихренность поля скорости течения

$$w = \partial v/\partial x - \partial u/\partial y;$$

где v и u – северная и восточная составляющие скорости). Положительные значения Ro соответствуют областям циклонической завихренности (принятое обозначение – красный цвет), отрицательные – антициклонической (принятое обозначение – синий цвет).

Наряду с использованием акустического профилографа течений в буксируемом режиме, приборы такого же типа используются для донной постановки на шельфе. При этом ADCP располагается излучателями вверх, и прибор регистрирует над собой профиль скорости течения почти до поверхности моря. Характерная глубина постановки приборов составляет 20-100 м. На ближнем шельфе (станция 25 м на траверзе Голубой бухты) на полигоне используется ADCP RDI WH-600 с функцией измерения характеристик поверхностного волнения, а вблизи бровки шельфа (станция 86 м на траверзе Толстого мыса) – ADCP RDI WH-300 (300 кГц). Эти приборы позволяют получать продолжительные ряды данных о профиле скорости течения на шельфе с вертикальным разрешением 1-2 м и временным осреднением 20 минут. Когерентность данных позволяет рассчитать взаимные спектры характеристик течений, полученных в различных точках проведения измерений (Зацепин, Куклев, 2016).

Для измерений вертикального распределения температуры воды и ее временного изменения на заякоренной буйковой станции используется линия термодатчиков – «термокоса», разработанная в ЮО ИО РАН (рис. 1.2). Технические характеристики измерительного комплекса «термокоса» представлены в таблице 1.1.

Программируемая частота опроса датчиков «термокосы» позволяет исследовать термо-гидродинамические процессы в широком диапазоне их временной изменчиво-

Таблица 1.1. Технические характеристики измерительного комплекса «термокоса» (точечно-распределенные датчики)

Характеристика	Значение
Диапазон измеряемых значений температуры	0 °С - +35 °С
Точность измерения температуры	0.01 °С
Чувствительность канала измерения температуры	0.001°С
Точность измерения давления	0.1 %
Временной тренд датчика давления	0.15% за 12 мес.
Разрешение по глубине	0.9-2 м
Постоянная времени датчиков: <i>температуры</i>	5 с
<i>давления</i>	0.05 с
Возможный и используемый период опроса датчиков	(2-3600) с; (10-30) с
Количество датчиков в цепи	от 19 до 27 шт.

сти: от нескольких секунд до сезонных, межгодовых масштабов. В случае автономного использования комплекса период проведения измерений определяется емкостью элементов питания, частотой опроса датчиков и, в общем случае, может быть ограничено емкостью накопителя информации. На онлайн-станции работа приборных комплексов обеспечивается береговым питанием, которое позволяет организовать непрерывное проведение измерений (перерывы связаны с технической профилактикой приборов и оборудования). Практически отсутствуют ограничения на частоту опроса датчиков и объем передаваемых на береговой сервер данных измерений.

«Термокоса» обычно устанавливается рядом с донными станциями ADCP. Термическая стратификация превалирует на шельфе над соленостной. Близкое расположение этих двух приборов позволяет изучать совместные эффекты стратификации и динамики вод (Сильвестрова, 2017).

В качестве основного инструмента мониторинга течений и гидрологической структуры вод над континентальным склоном используется измерительный комплекс «Аквалог» (рис. 1.3). Комплекс располагается на заякоренной буйковой станции, расположенной в траверзе Геленджикской бухты на глубине ~270 м (см. рис. VI). Комплекс представляет собой носитель с расположенной на нем измерительной аппаратурой

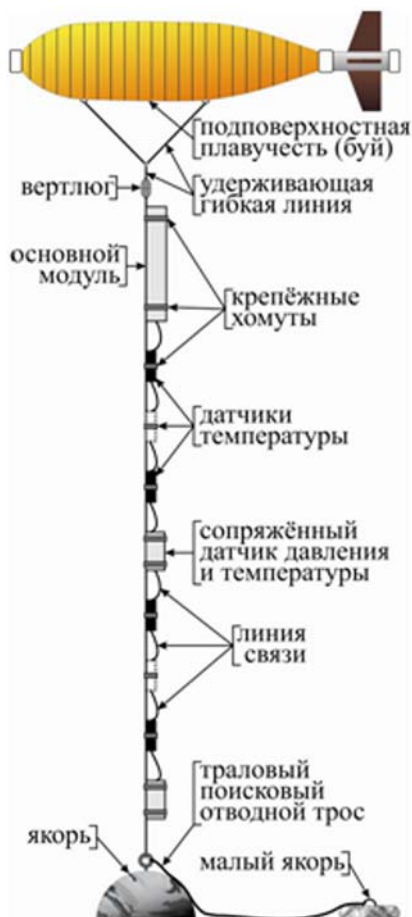


РИС. 1.2.

Схема измерительного комплекса «термокоса» на заякоренной буйковой станции

(CTD-зонд, трехкомпонентный акустический доплеровский измеритель течений, опционально химические, биотические датчики и пр.), который по заданной программе (обычно 4 раза в сутки) со скоростью 20 см/с перемещается по тросу, натянутому между подповерхностной плавучестью и донным якорем, и сканирует водную толщу. При этом производятся измерения с разрешением 1-2 м по вертикали следующих параметров: температура, соленость, плотность вод, вертикальная и горизонтальные составляющие скорости течения, мощность сигнала обратного акустического рассеивания, опционально - флуоресценция и прозрачность воды, растворенный кислород и другие гидрохимические параметры (см. рис. 1.3). Измеряемые параметры записываются в память прибора. В случае использования поверхностного буя с модемом мобильной связи данные измерений в режиме квазиреального времени передаются на береговой сервер.

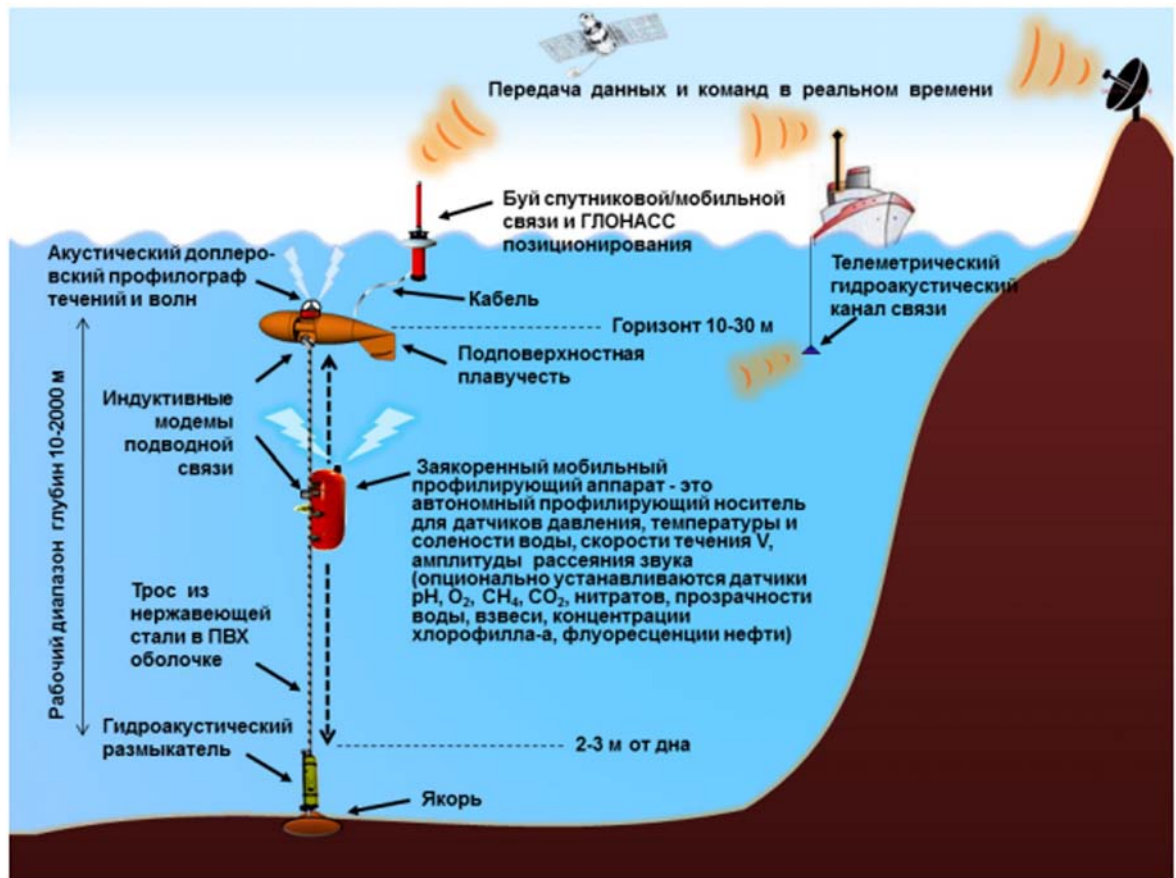


РИС. 1.3.

Схема функционирования зонда-профилографа «Аквалог» на заякоренной буйковой станции

Комплекс «Аквалог» разработан ИО РАН и малым инновационным предприятием ООО «Аквалог» и предназначен для мультидисциплинарных океанологических исследований и мониторинговых измерений на морском шельфе и континентальном склоне до глубины 1000 м. Он имеет энергетический ресурс, достаточный для долговременного (3-6 месяцев) профилирования водной толщи в программируемом режиме. Суммарная длина вертикальных перемещений «Аквалога» при номинальной емкости источника питания составляет около 400 км в отсутствие сильных течений. При наличии сильного течения (0.5–1.0 м/с) суммарная длина перемещений может уменьшиться до 200–250 км (Ostrovskii, Zatsepin, 2011; Островский и др., 2013).

На протяжении трех месяцев (с апреля по июль 2017 г.) производились измерения радиальных составляющих скорости поверхностного течения с помощью доплеровского

КВ-радиолокатора SeaSonde, установленного в конце пирса ЮО ИО РАН (рис. 1.4). По данным радарных измерений восстанавливались поля скорости течения и анализировалась их адекватность и сопоставимость с данными других измерений.

Для исследования циркуляции Черного моря и процессов горизонтального переноса - адвекции - вод эпизодически использовались лагранжевые трассеры – дрейфтеры (Сильвестрова и др., 2015, 2016). Для исследования течений в прибрежной зоне моря были изготовлены малые серии дешевых дрейфтеров. Схема дрейфтера представлена на рисунке 1.5. Дрейфтер состоит из влагозащитного плавучего бокса, в котором находятся GPS-датчик, GSM-передатчик и батарейный блок. К этому боксу с помощью тросика подсоединен крестообразный парус длиной 1 м и полушириной 0.5 м. Длина тросика может изменяться в широких пределах. Соответственно, парус может находиться как в приповерхностном слое моря, так и на глубине, что позволяет изучать течения на различной глубине моря.

Передача координат дрейфтера по мобильной связи может осуществляться с различной периодичностью: от 10 минут до нескольких часов. Режим с редкой передачей дан-



РИС. 1.4.

Расположение доплеровского КВ-радиолокатора SeaSonde и его комбинированной приемно-передающей антенны в конце пирса ЮО ИО РАН в Голубой бухте рядом с кунгом, в котором находится электронный блок радиолокатора и регистрирующий данные измерений компьютер



РИС. 1.5.

Схема (слева) и фотография (справа) дрейфера

ных осуществляется для экономии батарейного питания. В экономном режиме батарей может хватить на несколько недель работы дрейфера. Однако в большинстве случаев дрейферы находятся в море 1-2 суток, после чего их поднимают на борт судна или катера. При возрастании времени пребывания дрейфера в море возрастает вероятность его потери за счет ухода из зоны действия мобильной сети.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты радиолокационных исследований скорости поверхностного течения

В 2017 г. получен значительный объем данных о течениях на морской поверхности с применением непрерывных измерений с помощью доплеровского КВ-радиолокатора SeaSonde, стационарно установленного на пирсе ЮО ИО РАН. Эти данные использовались, главным образом, для их верификации на основе сопоставления с данными донных станций ADCP, установленных на 25 и 86 м.

Особенностью проведения эксперимента в 2017 году стала организация удаленного доступа через сеть интернет к управляющим блокам комплекса. Контроль и управление экспериментом осуществлялся с компьютеров Крыловского научного центра (г. Санкт-Петербург).

Кроме того, выполнено сопоставление данных радиолокационных измерений системой SeaSonde и синхронных спутниковых карт радиолокационного контраста морской поверхности.

В рамках «радарного» эксперимента:

- установлена и реализована возможность долговременного удаленного управления работой системы SeaSonde, не требующего дополнительного сервисного обслуживания;
- проверена надежность и репрезентативность долговременной регистрации данных о радиальных составляющих вектора скорости поверхностного течения с использованием комбинированной приемо-передающей антенны радиолокатора SeaSonde, установленной в крайней точке пирса ЮО ИО РАН для прибрежной акватории с радиусом около 20 км; использование комбинированной приемо-передающей антенны существенно упрощает размещение оборудования в одной точке, в частности на пирсе ЮО ИО РАН;
- на основе сопоставления с данными буксировок ADCP установлено, что применение методики «одноточечных» радиолокационных измерений для расчета полных векторов скорости поверхностного течения (Зацепин и др., 2017) в значительной части случаев не дает репрезентативных результатов.

Для получения достоверных данных пространственной структуры поверхностных течений необходимо использование двух или более разнесенных вдоль береговой линии радиолокаторов.

Результаты исследований структуры течений буксируемым ADCP

По данным измерений получены карты пространственного распределения структуры течений шельфовой зоны за период 05 апреля, 03 мая и 25 сентября. На рисунке 1.6. представлены карты поля течений в верхнем 5-метровом слое и в слое ниже горизонта 26 м, построенные по данным ADCP-съемки, выполненной 05 апреля 2017 г.

Съемка производилась в период начала формирования верхнего квазигоризонтального слоя (ВКС), и сезонный термоклин выражен слабо. Нижняя граница ВКС по данным гидрологического мониторинга находилась на глубине порядка 5 м, которая выбрана в качестве границы осреднения данных по вертикали.

Анализ результатов показывает, что в период съемки на полигоне присутствовало 3 слабеньких субмезомасштабных вихря (2 – антициклонических, 1 – циклонический), размерами от 1 до 2 км. Причем вихревые движения наблюдались только в ВКС. Ниже этого слоя явно выраженной завихренности не наблюдается. Результаты еще раз под-

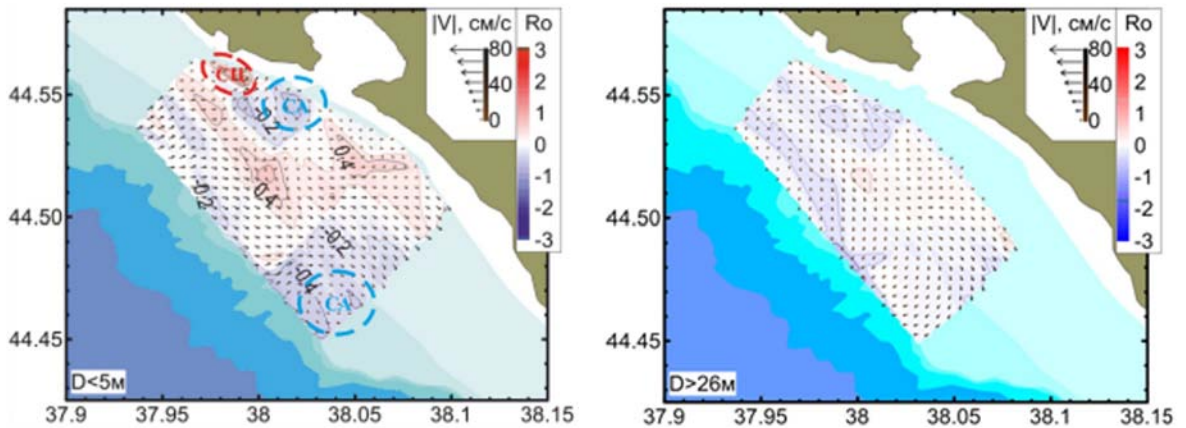


РИС. 1.6.

Осредненное по вертикали поле скорости течения: в верхнем 5-метровом слое (слева) и в слое ниже 26 м (справа) по данным съемки 05 апреля 2017 г. Красные линии – субмесомасштабный циклон (СЦ), синие линии – субмесомасштабный антициклон (СА)

твердили гипотезу, что субмесомасштабные вихри формируются в верхнем однородном слое моря и слабо выражены ниже термоклина (даже в случае слабого термоклина). Таким образом, термоклин является своеобразным барьером для более глубокого проникновения субмесомасштабного вихревого движения воды.

На рисунке 1.7 представлены графические материалы съемки, выполненной 25 сентября 2017 г. По погодным условиям было сделано всего 3 галса. Тем не менее, удалось зарегистрировать вихревую структуру, которую, с некоторой натяжкой, можно идентифицировать как циклоническое субмесомасштабное вихревое образование.

В отличие от съемки 05 апреля вихревые движения присутствуют практически во всей толще воды, поскольку вертикальная структура вод на шельфе характеризовалась относительной однородностью во всей толще от поверхности до дна.

В период съемки 03 мая вихревых структур на полигоне не наблюдалось (рис. 1.8). Течение на всей исследуемой акватории было направлено на юго-восток как в верхнем, так и в нижнем слое. Это течение, характеризующееся довольно слабым горизонтальным сдвигом скорости, было сформировано под влиянием небольшого мезомасштабного антициклонического вихря, расположенного между Новороссийском и Геленджиком, с центром на расстоянии 10-15 км от берега (рис. 1.9).

Обстоятельство, что в двух съемках из трех были выявлены субмесомасштабные вихри, еще раз подтверждает многолетнюю статистику проведения эксперимента: они обнаруживаются приблизительно в 70 процентах выполняемых съемок.

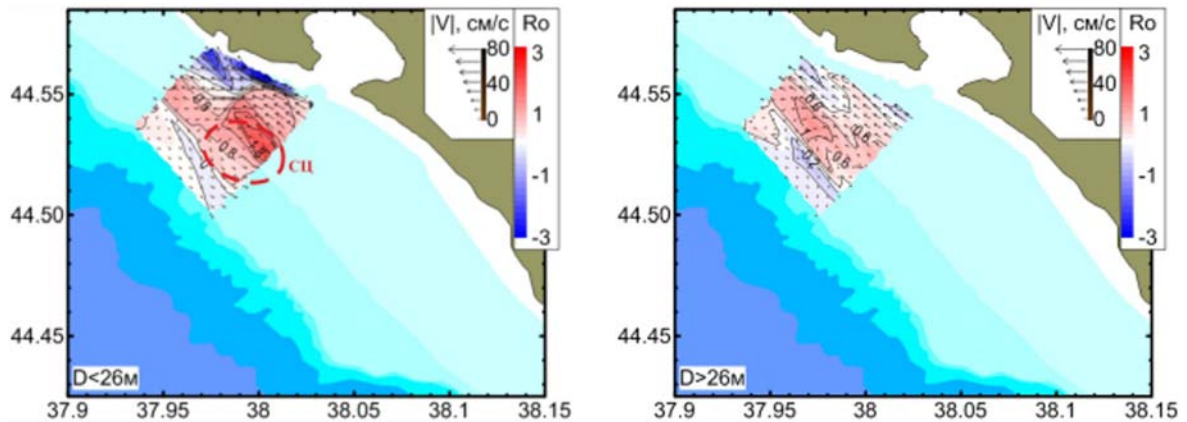


РИС. 1.7.

Осредненное по вертикали поле скорости течения: в слое выше (слева) и ниже (справа) горизонта 26 м по данным съемки 25 сентября 2017 г.

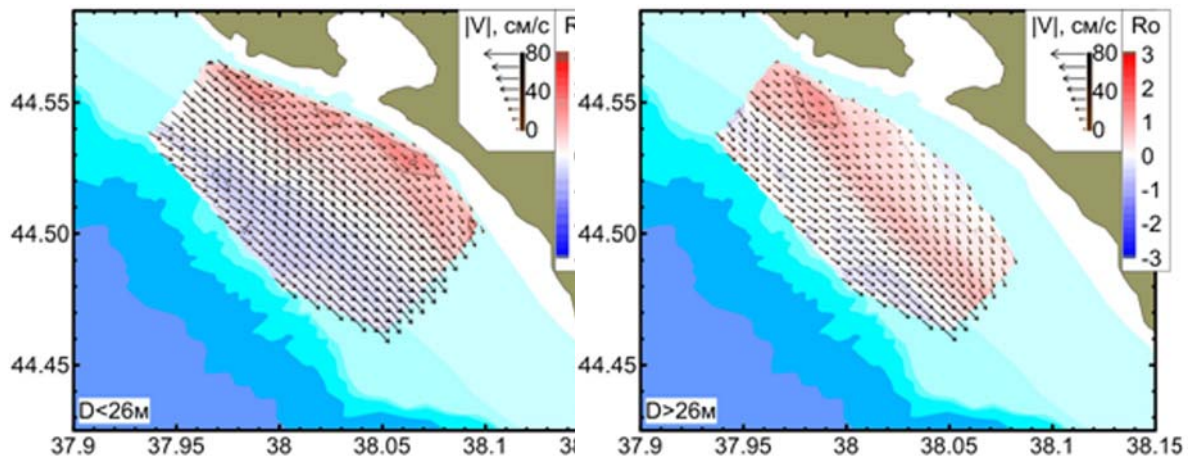


РИС. 1.8.

Осредненное по вертикали поле скорости течения: в слое выше (слева) и ниже (справа) горизонта 26 м по данным съемки 03 мая 2017 г.

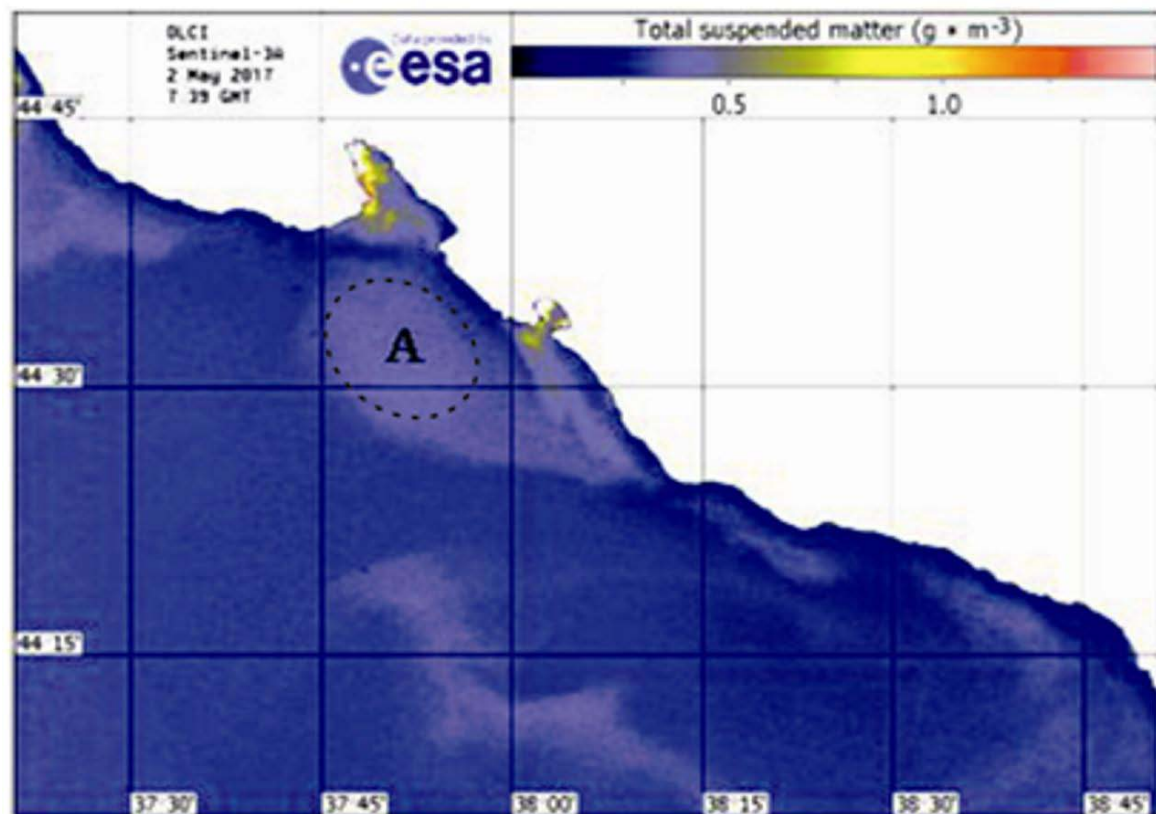


РИС. 1.9.

Спутниковое изображение мезомасштабного антициклонического вихря (он имеет более светлый тон и обозначен буквой «А») в поле взвешенного вещества в акватории между Новороссийском и Геленджиком. Данные OLCI Sentinel - 3A, 07:39 GMT, 02 мая 2017 г.

Исследование характеристик вертикальной термической структуры вод с помощью заякоренных «термокос» и изменчивости скорости течения с помощью донных ADCP, расположенных рядом с «термокосами»

За время непрерывной работы заякоренной «термокосы» на протяжении одного года (с 14.04.2017 г. по 14.04.2018 г.), установленной на изобате 25 м (внутренний шельф) на траверзе Голубой бухты, получены ряды уникальных по временному разрешению (10 с) данных изменчивости вертикальных распределений температуры. Она, а также рядом расположенная донная станция ADCP, подключена к многоканальной системе мониторинга с оперативной передачей данных по оптоволоконному кабелю в береговой центр. Одновременно были получены долговременные (3-4 мес.) ряды данных

автономной заякоренной «термокосы» на изобате 86 м (внешний шельф), установленной на траверзе Геленджикской бухты.

За указанное выше время измерений был прослежен сезонный ход формирования и разрушения термоклина, а также зарегистрированы короткопериодные процессы, надежно измеряемые только при непрерывном профилировании водной толщи, такие как внутренние волны, апвеллинги и даунвеллинги, субмезомасштабные вихри.

На рисунке 1.10 представлены примеры синхронного измерения вертикального распределения температуры воды трех- и двухсекционными цепочками температурных датчиков («термокосами»). Трехсекционная «термокоса» установлена вблизи кромки шельфа на траверзе Толстого мыса при удаленности от берега 7 км на изобате 86 м с координатами $44^{\circ}30.022'$ с.ш. и $037^{\circ}59.264'$ в.д. Регистрация вертикального распределе-

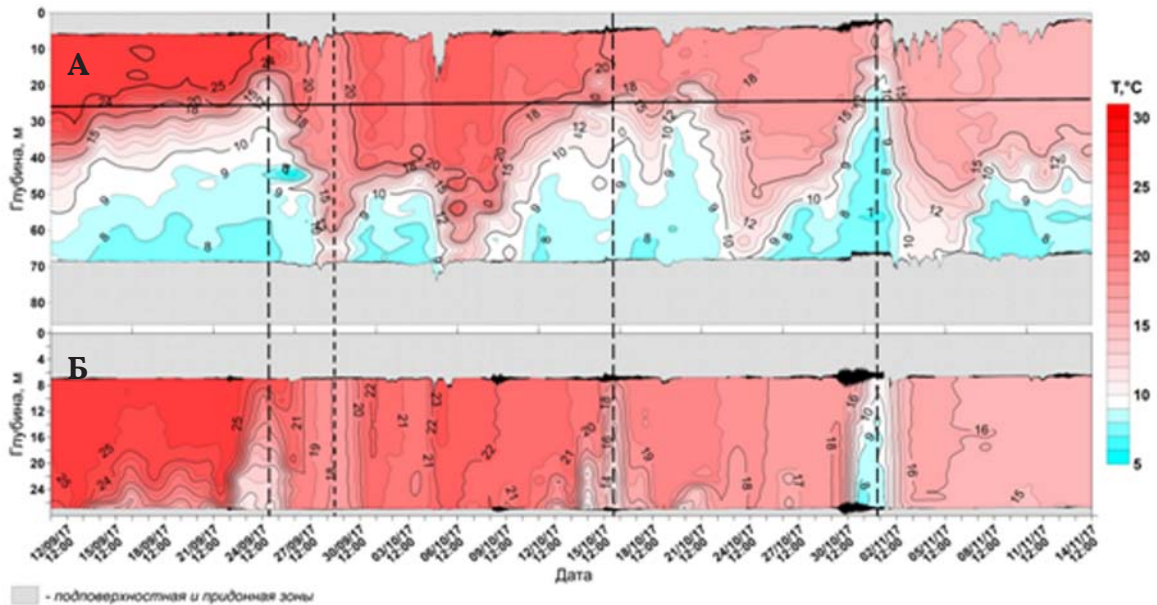


РИС. 1.10.

Вертикальное распределение температуры воды в период с 12 сентября по 14 ноября 2017 г.: А – «станция 86 м» в слое 8-68 м; Б – online «станция 26 м» в слое 6-25.4 м. Горизонтальная линия на рис. А – глубина 25.4 м, максимальный горизонт измерения для термокосы online. Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты экстремумов температуры, проявляющиеся на обеих «термокосах»

ния температуры происходит раз в 2 минуты. Расстояние между датчиками составляет 2 м. Двухсекционная «термокоса» работает в режиме реального времени и установлена

во внутреннем шельфе на траверзе Голубой бухты (б. Рыбацкой) при удаленности от берега 1.5 км на изобате 26 м, координаты постановки $44^{\circ}34.1440'$ с.ш., $037^{\circ}58.2550'$ в.д. Дискретность датчиков составляет 0.95 м, а измерения 10 сек. Расстояние между «термокосами» вдоль берега составляет 7 км, поперек берега - 6 км. Будем далее называть «термокосу» online и расположенный рядом с ней ADCP online «станцией 26 м», а «термокосу» и донный ADCP на изобате 86 м – «станцией 86 м».

Сопоставляя между собой результаты измерений, представленных на рис. 1.10 а и б, можно отметить, что изменения температуры на обеих «термокосах» происходят квазисинхронно. Понижения или повышения температуры в водной толще на внешнем и внутреннем шельфе продолжительностью в несколько суток и более являются синфазными.

Во временной изменчивости вертикального распределения температуры явно выражены циклы вертикальных колебаний изотермических поверхностей с периодом 10-15 суток, которые связаны с формированием цепочек меандров (циклонических, антициклонических) в период ослабления ОЧТ (Зацепин и др., 2013). В силу геострофического приспособления в циклоническом меандре изопикны (изотермы) заглубляются по направлению к берегу, а в антициклоническом меандре поднимаются.

Вместе с тем имеются события, на которые наряду с направлением и величиной скорости течения существенное влияние оказывает ветровое воздействие. Одно из таких событий на рис. 1.10 а и б отмечено вертикальной линией с более мелким пунктиром. В течение двух-трех суток с 27 по 29 сентября наблюдалось активное вертикальное перемешивание вод и их гомогенизация. При этом температура воды в верхнем слое понизилась, а в нижнем повысилась. Это событие было обусловлено сильным норд-остом, скорость которого в порывах превышала 20 м/с (рис. 1.11 а и 1.12 а).

Сопоставляя между собой характеристики течения на станциях 86 и 26 м в верхнем 26 м слое, отметим, что временная изменчивость течения выше для станции 26 м, что может свидетельствовать о большем проявлении короткопериодных и субмезомасштабных процессов вблизи берега по сравнению с бровкой шельфа (Зацепин, Куклев, 2016). Однако для более обстоятельных выводов нужна дальнейшая количественная обработка данных, включающая их корреляционный и спектральный анализы.

С целью выявления внутренних волн количественно выполнен анализ короткопериодной изменчивости температуры по данным измерений «термокосы» онлайн («станции 26 м»). Для анализа выбран период развитого сезонного термоклина и относительной стабильности его горизонтального положения. На основании кросс-спектрального анализа установлено, что флуктуации температуры с периодом порядка минуты и более, имеют высокую когерентность в придонном и в промежуточном слоях. При этом фазовый сдвиг колебаний не превышает 2° (рис. 1.13). Это означает, что высокочастотные внутренние волны в термоклине являются преимущественно одноמודовыми.

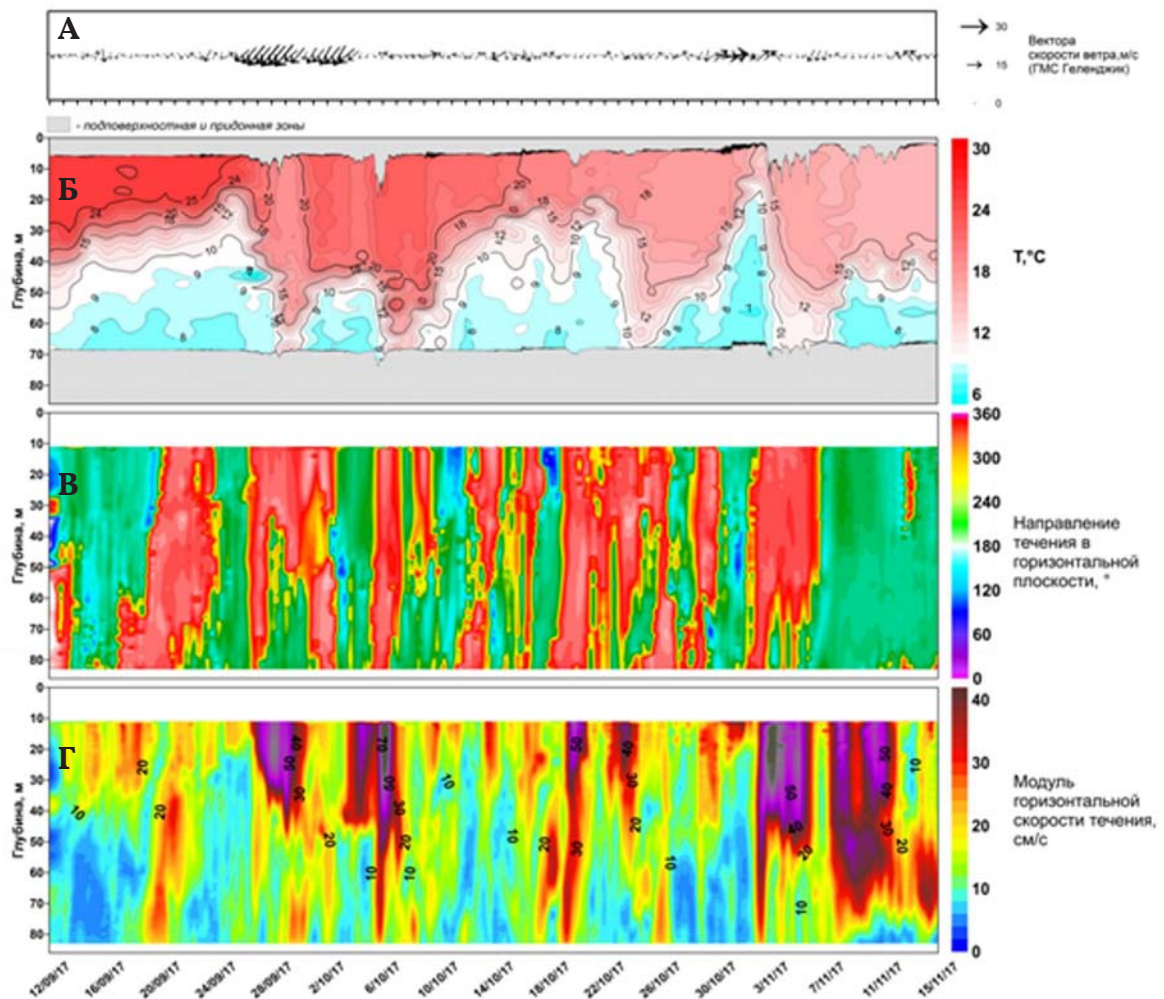


РИС. 1.11.

Результаты измерений на «станции 86 м» в период с 12.09.2017 г. по 15.11.2017 г.: А – скорость ветра; Б – вертикальные распределения температуры воды; В – направление течения в горизонтальной плоскости; Г – модуль горизонтальной скорости течений

Результаты исследования изменчивости вертикальной термохалинной структуры вод по данным измерения зонда-профилографа «Аквалог»

Данные приборного комплекса «Аквалог» позволяют получать картину временного хода вертикального распределения измеряемых параметров – STD-данных, компонент горизонтального течения и обратного акустического рассеивания. На рис. 1.14, 1.15, 1.16 представлен временной ход вертикального распределения горизонтальных течений,

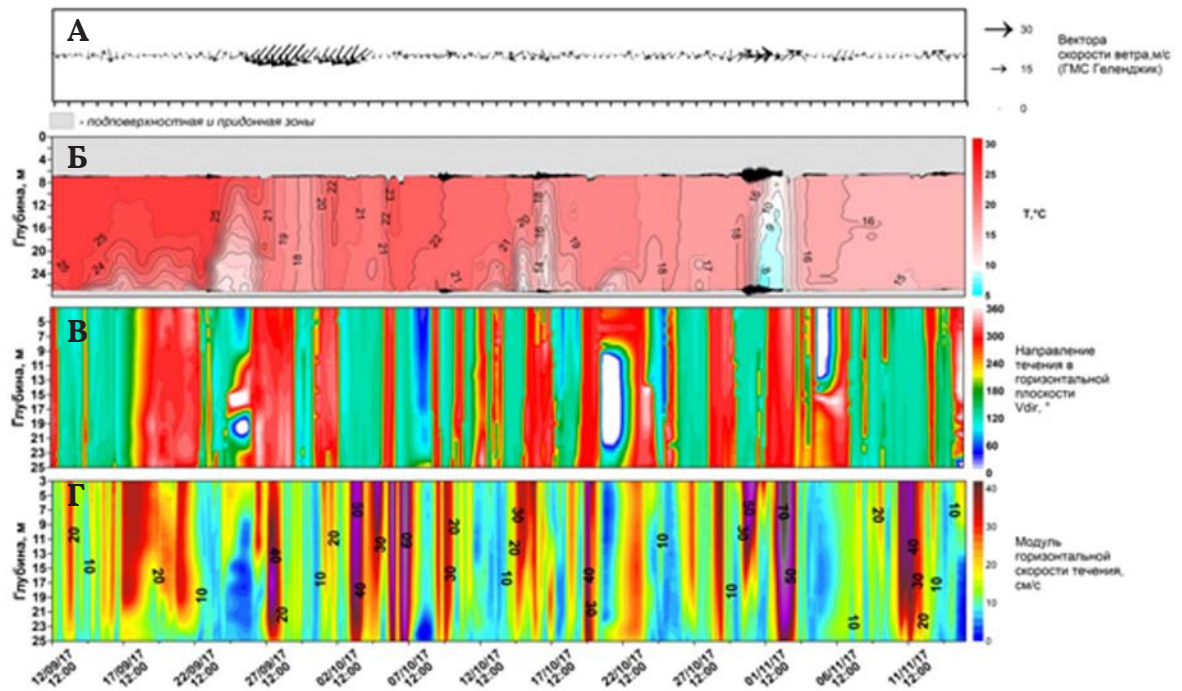


РИС. 1.12.

Результаты измерений на «станции 26 м» в период с 12.09.2017 г. по 15.11.2017 г.: А – скорость ветра; Б – вертикальные распределения температуры воды; В – направление течений в горизонтальной плоскости; Г – модуль горизонтальной скорости течений

сигнала обратного акустического рассеивания, температуры, солености и условной плотности за периоды измерений комплекса в конце 2016 г. и первой половине 2017 г. Отметим, что использование современного комплекса «Аквалог» дало возможность впервые за все время наблюдений на Черном море «визуализировать» процесс формирования холодного промежуточного слоя (ХПС).

В 2016 г. ХПС в его «классическом» определении (слой воды с температурой менее 8 °С) не наблюдался (рис. 1.14).

В 2017 г., впервые с 2013 г., мы наблюдали формирование ХПС с температурой ниже 8 °С (рис. 1.15). Высокочастотные измерения позволили детально рассмотреть динамику этого процесса. Первое кратковременное появление слоя воды с температурой менее 8 °С, связанное с локальными процессами охлаждения и конвекции, отмечено 13 февраля. Но последующие шторма и активное вертикальное перемешивание привели к исчезновению едва сформировавшегося слоя. Только к началу марта, когда развилась адвекция охлажденных вод из центральной части моря, наметился процесс устойчивого

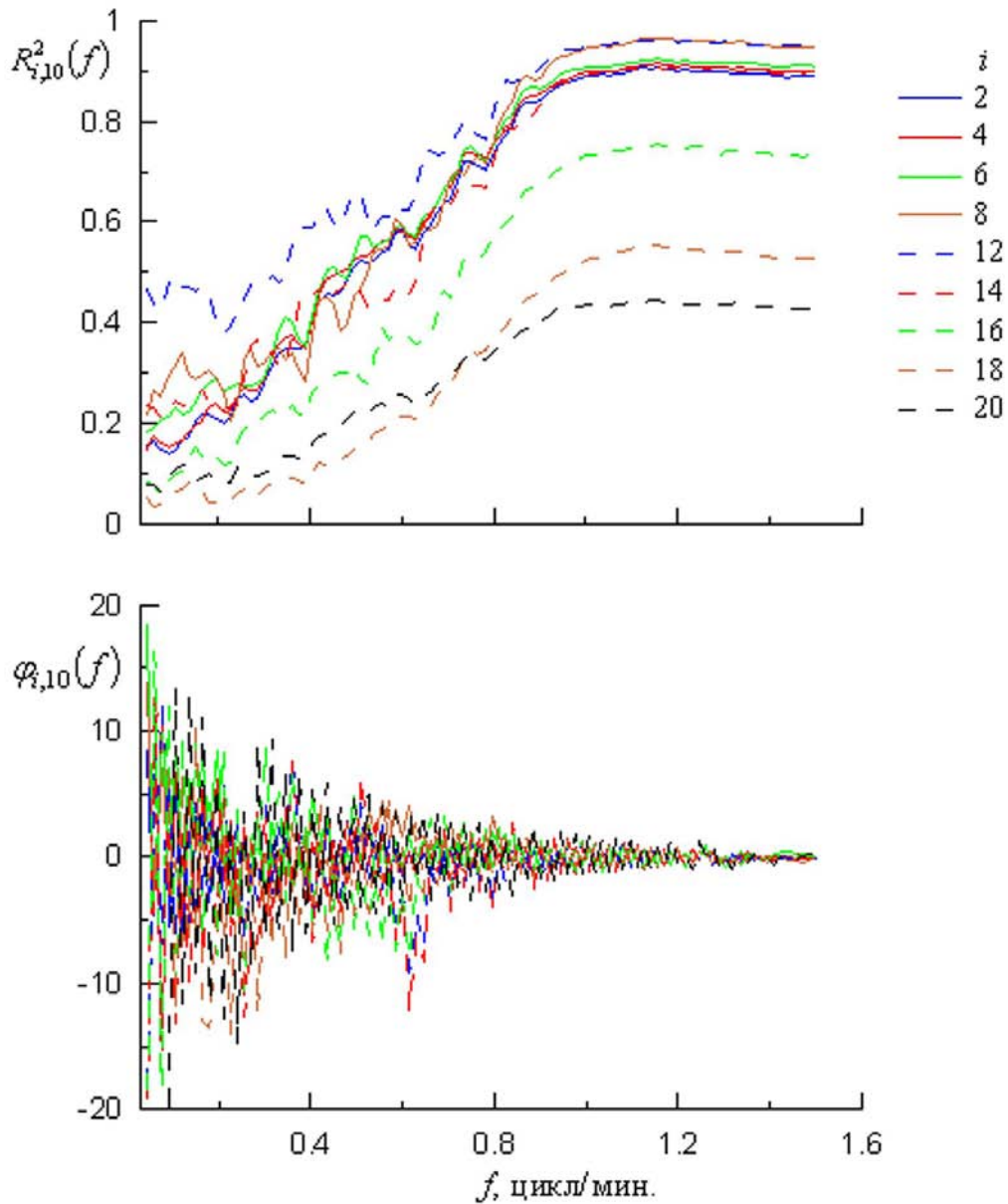


Рис. 1.13.

Графики квадратичной функции когерентности $R_{i,10}^2(f)$ (сверху) и фазового спектра $\varphi_{i,10}(f)$ (снизу). Здесь i – номер термодатчика, отсчитываемый снизу ($i=1, \dots, 21$). Когерентность рассчитывается относительно среднего датчика ($i = 10$)

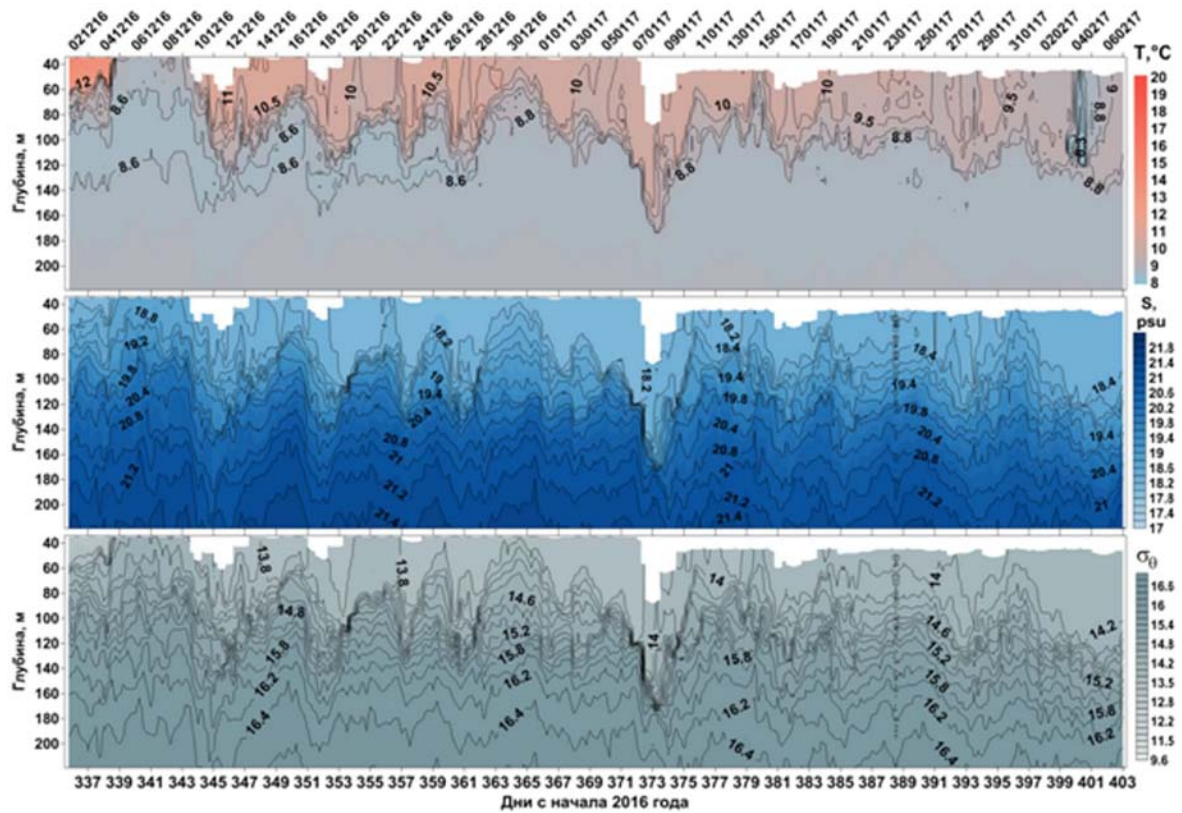


РИС. 1.14.

Временная изменчивость температуры воды (верхний график), солёности (средний график) и условной плотности (нижний график) по данным зонда-профилографа «Аквалог» в период с 30 ноября 2016 г. по 6 февраля 2017 г.

формирования ХПС. Можно считать, что окончательное формирование ХПС в акватории гидрофизического полигона произошло 8 марта, и далее его развитие соответствовало сезонной динамике температуры воды. Отмеченный в конце марта минимум температуры в ХПС составил $6.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубине 44 м. В среднем, вплоть до второй половины июня, толщина ХПС была порядка 70 м. В дальнейшем в результате вертикального обмена с выше и нижележащими более теплыми слоями его толщина стала уменьшаться, а температура в ядре увеличилась до $7.3\text{--}7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.16).

Динамика течений в целом была типичной для данного района: периодические усиления скорости течения, достигающие $40\text{--}70\text{ см/с}$, и проникающие вглубь вплоть до 160 м (рис. 1.16 и 1.17). Мощные течения вызывали заглупление изопикн на 50 и более метров в течение двух-четырёх дней. В силу геострофического приспособления, юго-

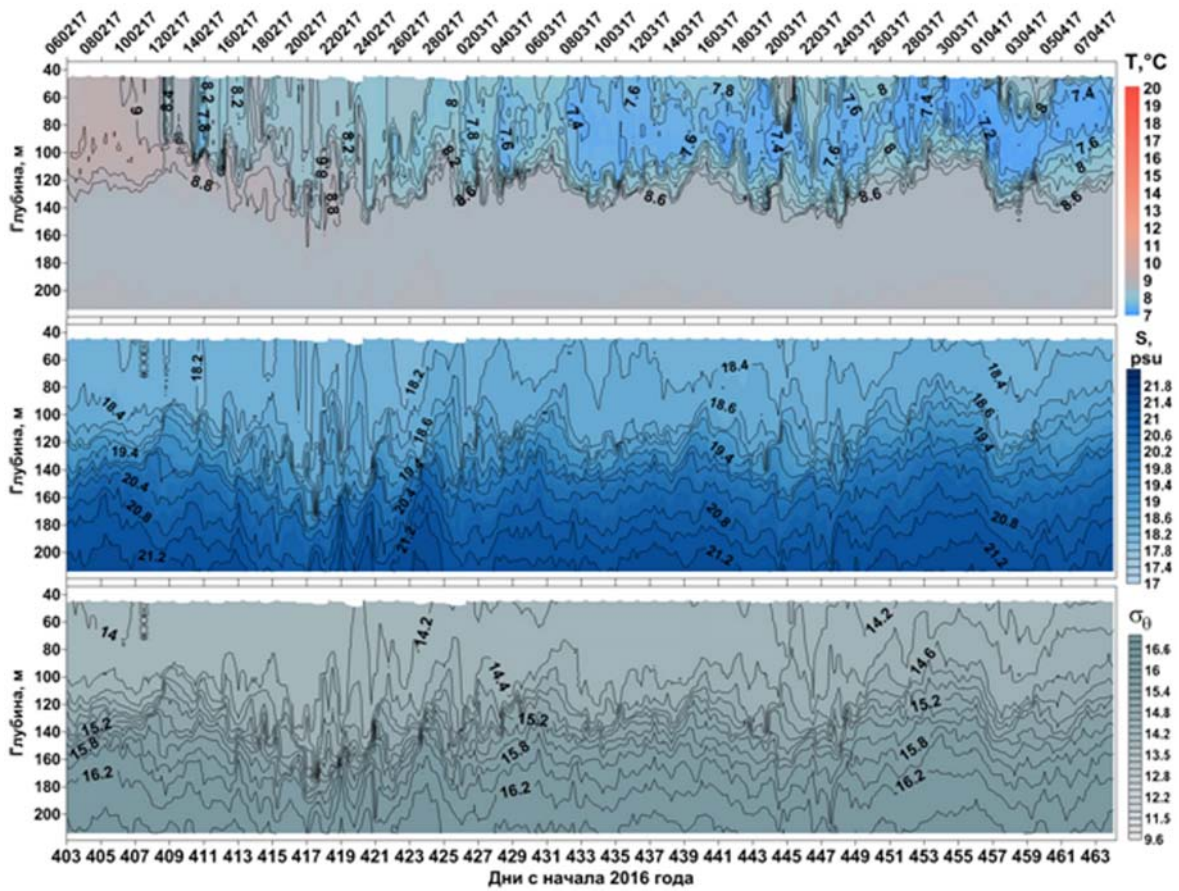


РИС. 1.15.

Временная изменчивость температуры воды (верхний график), солёности (средний график) и условной плотности (нижний график) по данным зонда-профилографа «Аквалог» в период с 6 февраля по 8 апреля 2017 г.

восточное вдольбереговое течение связано с подъемом изопикн, тогда как северо-западное вдольбереговое течение – с их заглужением.

Большой интерес представляет периодическое усиление сигнала обратного акустического рассеяния в период с декабря 2016 г. по февраль 2017 г. На рисунке 1.17 оно проявляется в виде слегка наклонных и широких «полос» с временной продолжительностью 1–5 суток. Эти полосы, как правило, совпадают по времени с событиями увеличения скорости течения. Можно предположить, что сильные проникающие до дна течения на шельфе и верхней части континентального склона производят взмучивание илстых

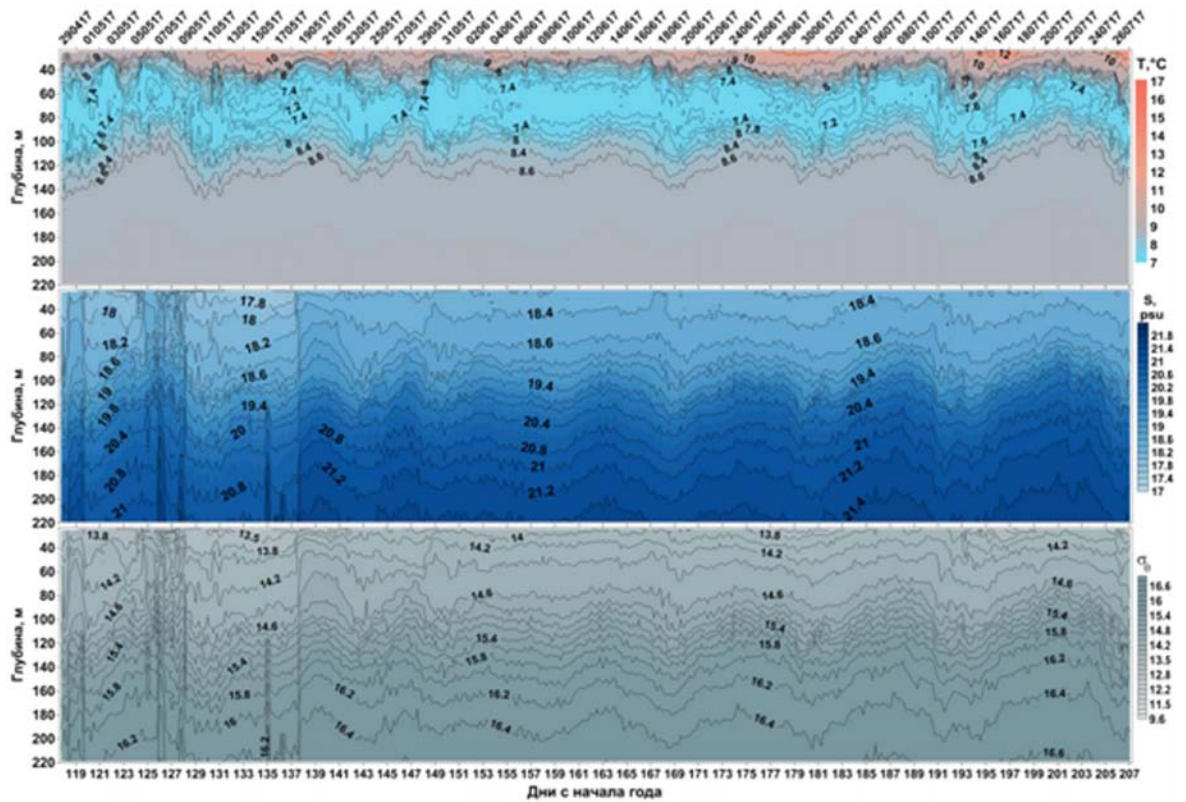


РИС. 1.16.

Временная изменчивость температуры воды (верхний график), солёности (средний график) и условной плотности (нижний график) по данным зонда-профилографа «Аквалог» в период с 27 апреля по 26 июля 2017 г.

осадков. Эти осадки переносятся течением в более глубоководную зону моря, в частности в точку постановки зонда-профилографа «Аквалог» на изобате 270 м. Частицы ила постепенно оседают (со скоростью несколько мм/с), и этим обусловлен наклон полос. В тёплый период года полосы повышенного акустического рассеяния исчезают (рис. 1.18): активного взмучивания осадков не происходит из-за уменьшения скорости течения и появления плотностной стратификации, препятствующей достижению дна сильными течениями. Впрочем, вышеприведенное объяснение широких полос является гипотезой, нуждающейся в дальнейших физико-седиментологических исследованиях.

В весенне-летний период наблюдалось ослабление гидродинамических процессов. Следствием этого стало общее снижение концентрации взвеси в воде и уменьшение турбулентности. На этом фоне проявились процессы, которые не наблюдаются в хо-

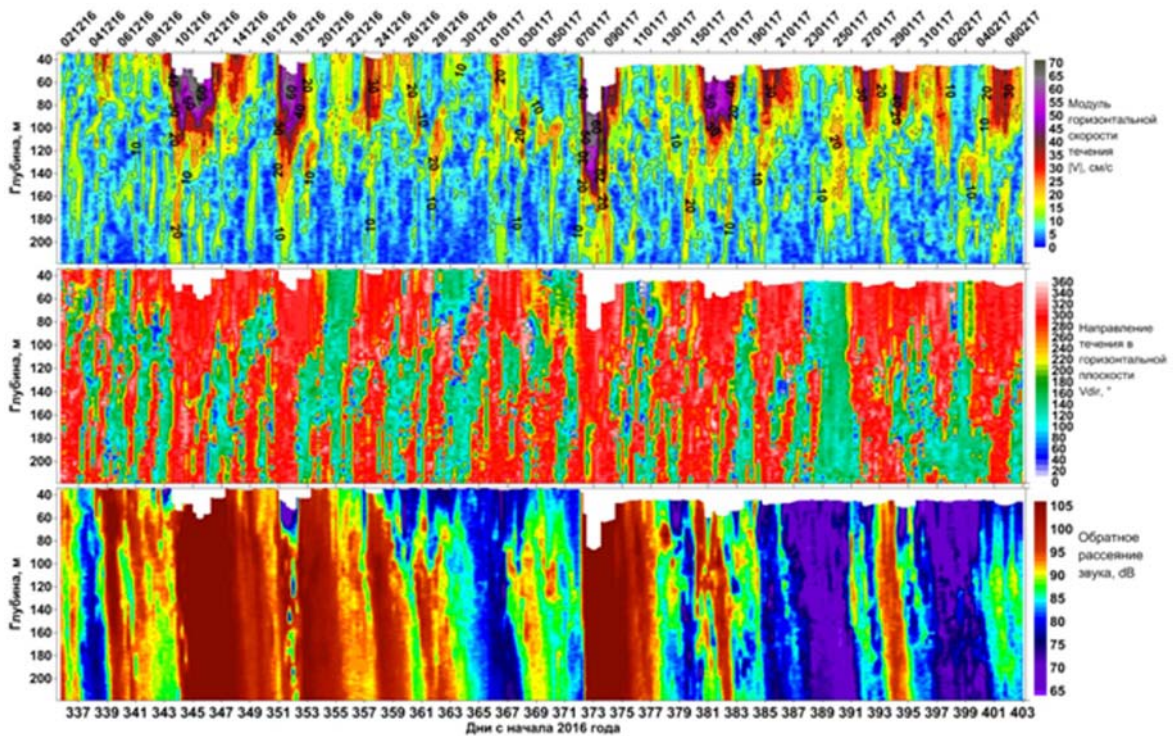


Рис. 1.17.

Временная изменчивость модуля горизонтальной скорости течения (верхний график), направления течения в горизонтальной плоскости (средний график) и сигнала обратного акустического рассеивания (нижний график) по данным зонда-профилографа «Аквалог» в период с 30 ноября 2016 г. по 6 февраля 2017 г.

лодное время года. Начиная с начала мая на графике сигнала обратного акустического рассеивания (нижний график на рис. 1.18) можно наблюдать суточные колебания концентрации взвешенных частиц в исследуемом слое. К ночи их становится больше ближе к поверхности, в то время как в дневное время сигнал концентрируется вблизи изопикны 15,8, глубже которой практически исчезает растворенный в воде кислород. Аналогичная картина наблюдалась и в предыдущие годы. И эти вариации, как показали отборы биологических проб, связаны с суточными миграциями зоопланктона, в первую очередь черноморских рачков *Calanus Euxinus*. В светлое время суток активный зоопланктон опускается к нижней границе деятельного кислородосодержащего слоя моря. В темное время суток он поднимается к поверхности. Точные причины подобной миграции неизвестны. Однако стоит отметить, что в районе изопикн 15,8–16,0 всегда

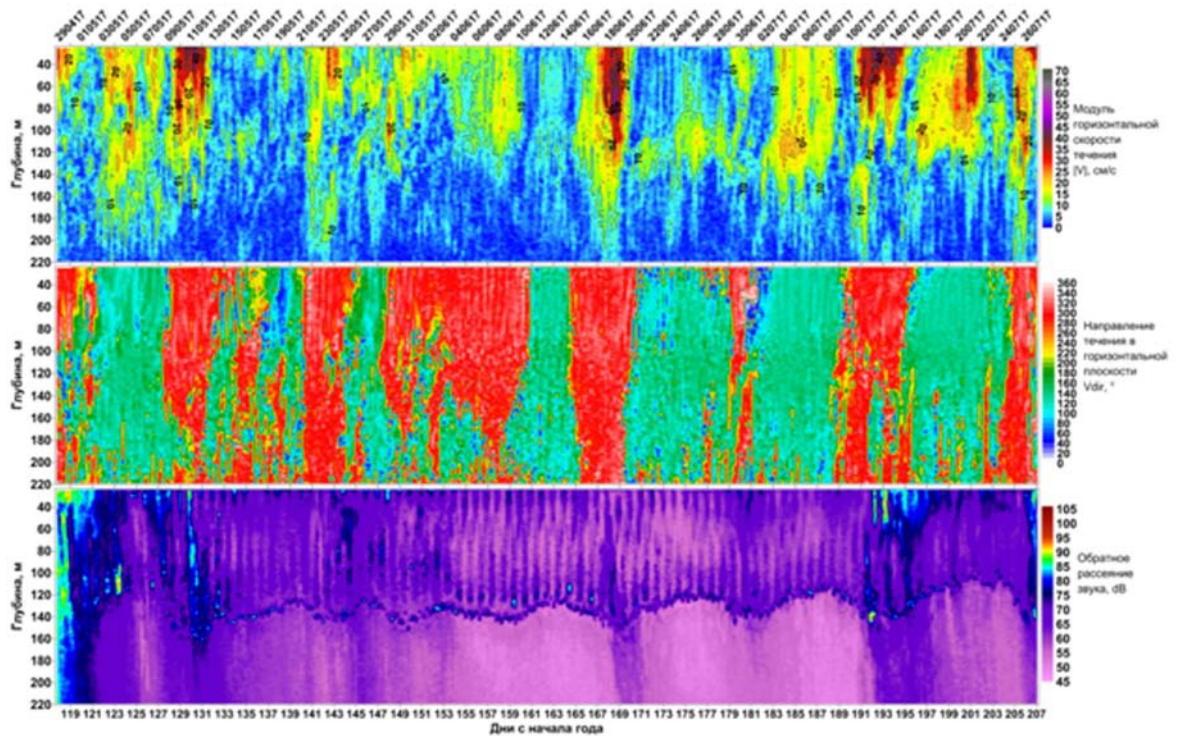


Рис. 1.18.

Временная изменчивость модуля горизонтальной скорости течения (верхний график), направления течения в горизонтальной плоскости (средний график), сигнала обратного акустического рассеивания (нижний график) по данным зонда-профилографа «Аквалог» в период с 27 апреля по 26 июля 2017 г.

наблюдается повышенное содержание взвешенных частиц, которые, скорее всего, достигают в этом слое нейтральной плавучести и, предположительно, служат кормовой базой для рачков. Вероятно, этот же слой ответственен за окончательное исчезновение растворенного кислорода, который расходуется на окисление органического вещества.

С конца апреля снизилось ветровое воздействие (экмановская накачка циркуляции), что выразилось в падении скорости течения и уменьшении вертикальных колебаний изопикнических (термических и халинных) поверхностей. За исключением отдельных эпизодических усилений (до 30–40 см/с) скорость течений редко превышала 20 см/с.

Результаты дрейфтерных экспериментов

Дрейфтерный эксперимент на гидрофизическом полигоне проводился в период с 25 по 27 июня 2017 г. Было произведено несколько запусков дрейфтеров с различным за-

глублением подводного паруса, которые позволили охарактеризовать течения в шельфовой склоновой зоне за период проведения экспериментов.

Во время эксперимента 25 июня наблюдалось мощное вдольбереговое северо-западное течение. В первом запуске дрейфтеры за полтора часа прошли 3 км, что соответствует скорости течения 55 см/с. Визуально были отмечены полосы конвергенции (мусор, слики), похожие на проявление Ленгмюровских структур.

В эксперименте 26 июня первый запуск был сделан на небольшом удалении от берега между мысами Голубой бухты. Со временем все дрейфтеры, отклоняясь в сторону берега, зашли в Голубую бухту. Следующие 4 запуска были сделаны северо-западнее Голубой бухты. По смещению дрейфтеров было определено вдольбереговое течение северо-западного направления со скоростями около 30 см/с.

В эксперименте 27 июня всего было выполнено 3 запуска. Течение наблюдалось северо-западное, скорость около 15 см/с. Погода была штилевая во время первых 2 запусков, далее наблюдался слабый ветер. Сливовых полос не обнаружено, были большие овальные скопления мусора.

Более детальный анализ результатов дрейфтерных экспериментов позволил выявить ряд особенностей, которые требуют дополнительных пояснений.

В эксперименте 25 июня течение по вертикали на всех горизонтах было квазиоднородным. Была выявлена горизонтальная неоднородность, которая проявлялась следующим образом: дрейфтеры часто сбивались парами, то есть от первоначального положения между дрейфтерами 30-40 м расстояние уменьшалось до 3-5 м, а расстояние между образовавшимися парами увеличивалось до 100-150 м. Визуально были отмечены полосы конвергенции (мусор, слики), похожие на проявление Ленгмюровских структур.

Скорость течения во время первого запуска с 11:28 до 12:22 составила 65 см/с для дрейфтеров с заглублением паруса 0-0.5 м и для дрейфтеров с заглублением паруса 3-4 м и 5-6 м – 59 см/с (рис. 1.19).

По данным станции ADCP, располагающейся в створе Голубой бухты, скорость течения в 12:00 на горизонте 3-5 м составила 66 см/с, на горизонте 5-10 м – 63 см/с. Начало траекторий дрейфтеров приблизительно соответствует положению ADCP. Таким образом, измерения скорости течений по данным ADCP и дрейфтеров практически полностью совпадают.

В эксперименте 26 июня во время первого запуска на траверзе Голубой бухты все дрейфтеры, отклоняясь к берегу, зашли непосредственно в бухту. Это позволяет предположить, что при устойчивом северо-западном течении в бухте формируется вдольбереговое течение с антициклонической завихренностью. Выявленная динамика соответствует одному из механизмов самоочищения вод в бухтах, которое оказывает положительное влияние на состояние их экосистем.

Дрейфтеры, запущенные за створом (по направлению течения) Голубой бухты, двигались в северо-западном направлении. Во время запуска с 13:03 до 13:16 дрейфтер с заглу-

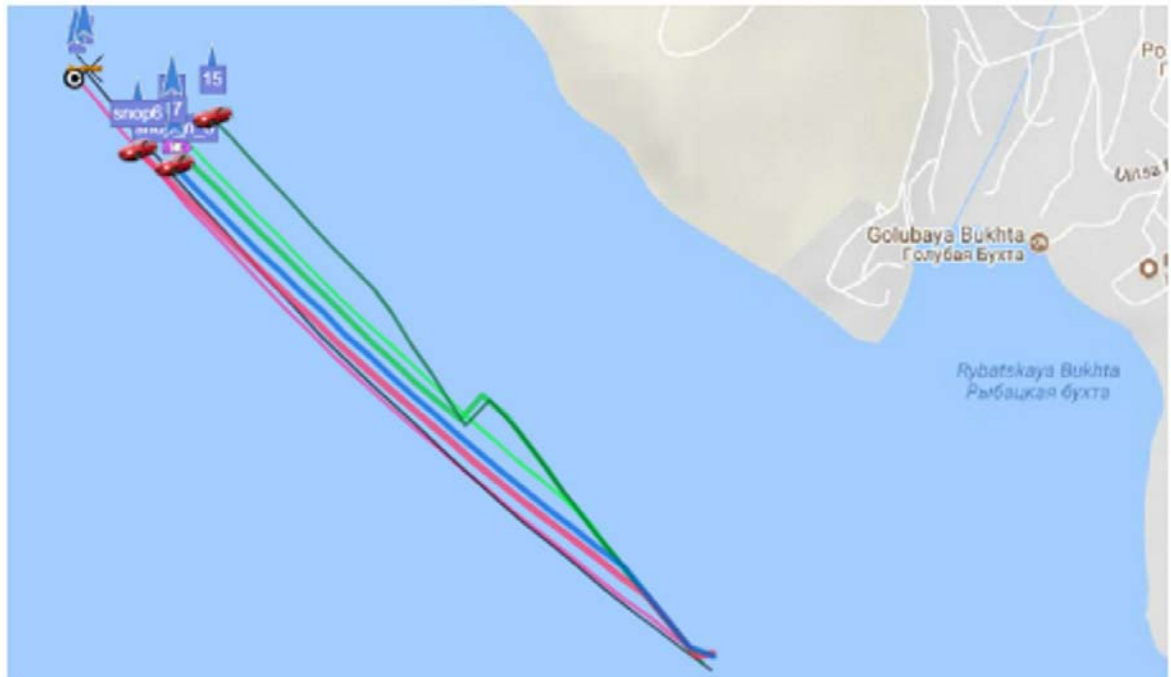


Рис. 1.19.

Траектории движения дрейфтеров 25 июня 2017 г. с 11:28 до 12:22. Начало запуска дрейфтеров – створ Голубой (Рыбацкой) бухты

блением паруса 0–0.5 м двигался со скоростью 40 см/с направлением 320° . Дрейфтеры с заглублением паруса 3–4 м и 5–6 м двигались со скоростью 32 см/с, однако направление составило 310° . Следовательно, с глубиной наблюдался небольшой разворот течения против часовой стрелки (левый поворот), что противоречит теории экмановского разворота течений. По данным ADCP, скорость течения в слое от 3 до 10 м составила около 35 см/с. Таким образом, скорость по данным дрейфтеров совпадает с данными ADCP, однако в самом поверхностном слое по данным дрейфтеров отмечается увеличение скорости течения, что не может быть измерено при помощи ADCP из-за наличия слепой зоны. Выявленный левый поворот течений можно объяснить инерционностью приспособляемости глубинных течений к переменному ветру. Отметим, что за все время проведения экспериментов на гидрофизическом полигоне классический экмановский разворот течений с глубиной практически не наблюдался. На формирование структуры течений шельфовой зоны Черного моря оказывает влияние большое количество более значимых внешних факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 1

1. Дивинский Б.В., Куклев С.Б., Зацепин А.Г., Чубаренко Б.В. Моделирование субмезомасштабной изменчивости морских течений в прибрежной зоне Черного моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 6. С. 903–908.
2. Дивинский Б.В., Куклев С.Б., Зацепин А.Г. Численное моделирование события полного апвеллинга в северо-восточной части Черного моря на гидрофизическом полигоне ИО РАН // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 4. С. 683–689.
3. Елкин Д.Н., Зацепин А.Г. Лабораторное исследование механизма периодического вихреобразования за мысами в прибрежной зоне моря // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
4. Елкин Д.Н., Зацепин А.Г. Лабораторное исследование механизма сдвиговой неустойчивости морского вдольберегового течения // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 5. С. 614–621.
5. Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В. и др. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308.
6. 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 наблюдений // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 4. С. 510–519.
7. Зацепин А.Г., Кондрашов А.А., Корж А.О. и др. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
8. 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. 629–629.
9. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Островский А.Г. и др. О природе короткопериодных колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49. № 6. С. 717–732.
10. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Островский А.Г. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50. № 1. С. 16–16.
11. Зацепин А.Г., Елкин Д.Н., Корж А.О. и др. О влиянии изменчивости течения в глубоководной зоне Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 3. С. 16–25.

12. *Зацепин А.Г., Куклев С.Б.* Изменчивость модуля горизонтальной скорости течения на ближнем шельфе и за бровкой шельфа на Геленджикском полигоне ИО РАН в Черном море: сравнительный анализ. // Научный вестник. Тамбов. 2016. № 2(8). С. 86-95.
13. *Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Куклев С.Б. и др.* Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 203-214.
14. *Зацепин А.Г., Горбацкий В.В., Мысленков С.А. и др.* Сравнение характеристик течений, измеренных КВ и СВЧ радиолокаторами на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море, с данными ADCP и дрейфтеров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 250-266.
15. *Ижицкий А.С., Завьялов П.О.* Гидрофизическое состояние вод Феодосийского залива в мае 2015 г // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 538-545.
16. *Куклев С.Б., Дивинский Б.В., Зацепин А.Г.* Исследования гидрофизических процессов на Черноморском полигоне ИО РАН методами математического моделирования - Материалы конференции МСОИ. М.: ИО РАН. 2017. Т. 2. С. 38-41.
17. *Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А. и др.* Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259-259.
18. *Сильвестрова К.П., Краюшкин Е.В., Мысленков С.А.* Анализ данных дрейфующих буев и буксируемого профилографа течений на подспутниковом полигоне в Черном море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 171-184.
19. *Сильвестрова К.П., Мысленков С.А., Зацепин А.Г. и др.* Возможности использования GPS-дрейфтеров для исследования течений на шельфе Черного моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 159-166.
20. *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.
21. *Ostrovskii A., Zatsepin A.* Short-term hydrophysical and biological variability over the northeastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys // Ocean Dynamics. 2011. Т. 61. № 6. Р. 797-806.