

УДК 551.46.07

АВТОНОМНЫЙ МОБИЛЬНЫЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МОРСКОЙ СРЕДЫ НА ЗАЯКОРЕННОЙ БУЙКОВОЙ СТАНЦИИ

© 2013 г. А. Г. Островский, А. Г. Зацепин, В. А. Соловьев, А. Л. Цибульский, Д. А. Швоев

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

e-mail: osasha@ocean.ru

Поступила в редакцию 10.04.2012 г.

Представлены новые результаты разработки заякоренного профилографа “Аквалог”, предназначенного для решения задач мультидисциплинарных океанологических исследований и экологического мониторинга морской среды. Обобщены данные о функционировании профилографа, полученные в результате натурных экспериментальных исследований в северо-восточной части Черного моря в 2011 г. Важным научным результатом этих исследований стало открытие с помощью профилографа “Аквалог” противотечения под Основным черноморским течением в слое 500–900 м.

DOI: 10.7868/S0030157413020147

ВВЕДЕНИЕ

К автономным мобильным техническим средствам вертикального зондирования морской среды заякоренного типа относятся зонды, периодически вытравливаемые с помощью заякоренных донных и поверхностных лебедок, а также профилографы, перемещающиеся по вертикально натянутому тросу на буйковых станциях [2]. Во втором случае разработано два варианта систем перемещения: устройства с изменяемой плавучестью и устройства, катящиеся по буйрепу с помощью электродвигателя.

Разработка автономных мобильных океанологических профилографов началась в 1970-х гг. Тогда же были запущены в мелкосерийное производство профилографы МК-I/II Cyclosonde [14], с помощью которых удалось получить около 30 тысяч вертикальных профилей температуры и солёности воды в верхних слоях океанов, омывающих Североамериканский континент. С конца 1990-х годов океанологические профилографы, передвигающиеся вверх-вниз по тросу самостоятельно или с помощью лебедки, рассматриваются как перспективная компонента системы мониторинга Мирового океана. За рубежом за последние 20 лет были разработаны и испытаны в морских условиях как минимум 19 образцов, некоторые из которых стали производиться серийно (см. [2]). В январе 2011 г. Вудсхольский океанографический институт при поддержке Национального научного фонда США объявил новый конкурс по разработке 2-х типов профилографов (прибрежного и глубоководного), которые перемещаются по тросу (термин – “coastal and global wire following profilers”).

Эти разработки нацелены на решение задач крупнейшей американской программы – Инициативы в области океанских обсерваторий (Ocean Observatories Initiative). С 2006 г. ведется разработка ответственного океанологического мобильного профилографа с электродвигателем, названного “Аквалог”, для заякоренной буйковой станции [3, 4, 11]. Разрабатываемый нами профилограф представляет собой подвижную платформу с океанологическими датчиками для проведения мультидисциплинарных научных исследований и экологического мониторинга. В данной статье представлены новые результаты этой разработки и описан опыт применения профилографа «Аквалог» в целях натурных океанологических исследований в различных климатических условиях.

2. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПРОФИЛОГРАФОВ НА ЗАЯКОРЕННЫХ БУЙКОВЫХ СТАНЦИЯХ

2.1. Научные исследования. В основе научных проектов с использованием профилографов лежит необходимость накапливать длительные временные ряды вертикальных распределений параметров океана в фиксированных географических точках в ключевых для мониторинга акваториях. Основное назначение профилографов состоит в регулярном получении вертикальных тонкоструктурных профилей различных характеристик морской среды с временным интервалом достаточным, чтобы разрешить энергоактивные внутрисезонные колебания на протяжении нескольких сезонов или даже лет. Профилографы необходимы также для диагностирования эпизодических внут-

риводных аномалий со временем жизни несколько часов. Важно, что с помощью профилографов соответствующие измерения выполняются одним набором измерительных датчиков во всем столбе воды от приповерхностного слоя до дна, что позволяет получить однородные данные с одинаковой точностью.

Использование профилографов должно помочь ответить на вопрос о том, как под воздействием меняющегося климата трансформируются физические и химические характеристики морской воды, динамика течений, состав морской среды и ее биоты, оказывая влияние на потоки взвешенного и растворенного вещества вблизи границ раздела океан-атмосфера, пелагиаль-мезопелагиаль (~200 м), мезопелагиаль-батиаль (~1000 м).

Потоки и состав живого и неживого вещества в верхнем 1000-метровом слое моря контролируются:

– динамическими факторами, в первую очередь горизонтальной адвекцией, турбулентностью и вертикальным перемешиванием;

– биохимическими факторами, такими как миграция, первичная продукция и дыхание организмов.

Воздействия и тех и других факторов нестационарны, причем характер зависимости обменных процессов от времени меняется с глубиной.

Для того чтобы понять, как на протяжении десятилетий морские экосистемы приспосабливаются к длительным трендам климата и реагируют на крупномасштабные явления, такие как Эль-Ниньо и североатлантическое колебание, нужны измерения на малых временных масштабах от нескольких часов до нескольких суток. Частые измерения необходимы для изучения природных механизмов, непосредственно ответственных за изменения морской среды.

Морские экосистемы постоянно находятся под влиянием динамических процессов с периодами, близкими к суточному, инерционному и полусуточному, амплитуды колебаний которых весьма велики (см., например, [1]). Воздействия нерегулярных событий, таких как апвеллинги и каскадинги, на экосистемы также могут быть очень значительными, и их надо отслеживать. Задача эта сложная, поскольку сами события обычно происходят редко, несколько раз в год. Оценить влияние короткопериодных, иногда хаотичных динамических процессов на морскую биоту возможно только на основе постоянных измерений.

Биотические процессы также характеризуются высокой перемежаемостью во времени. Характерный пример – это суточные миграции мезозoopланктона. Например, в деятельном слое Черного моря движение мигрирующих видов мезозoopланктона вниз занимает 2 часа, а вверх – 3 часа, во время рассвета и заката, соответственно [9, 10, 13]. Естественно периодичность наступления событий спуска и подъема меняется в зависимости от

времени года. Чтобы исследовать такие значимые, но кратковременные процессы, нужно проводить частые зондирования в течение длительного времени, как минимум, одного сезона, а лучше одного года, чтобы учесть фоновые сезонные условия.

Вертикальное профилирование, в отличие от измерений на фиксированных горизонтах, должно быть адекватным тонкоструктурным неоднородностям морской среды, чтобы получить вертикальный “срез” термохалинных линз и интрузий, скоплений планктона и звукорассеивающих слоев с разрешением не хуже 1 м. Тонкие протяженные по горизонтали скопления организмов характерны для слоистой организации морских экосистем (см. обзор [12]). Тонкие звукорассеивающие слои часто оказываются проявлением скоплений мезозoopланктона и микронектона на вертикальных градиентах свойств морской среды и границах раздела водных масс [6, 8]. Например, по данным измерений вертикальных профилей обратного акустического рассеяния на частоте 2 МГц в северо-восточной части Черного моря слой диапаузы копепода *Calanus euxinus* (размерами до нескольких миллиметров в длину) имеет толщину порядка 1 м, горизонт его залегания варьирует когерентно с положением изопикны 15.8 г/м³ в нижней части редокс зоны в диапазоне глубин 130–160 м [11]. Физические процессы, такие как внутренние волны, интрузии, перемешивание и горизонтальная адвекция приводят к перераспределению организмов, в результате чего тонкие слои могут быстро меняться за несколько часов.

Таким образом, для изучения экосистем и их реакции на внешние, в том числе на климатические воздействия, необходимо измерять вертикальные профили физических, химических и биологических характеристик с разрешением лучше 1 м, а профилирование нужно проводить с интервалом порядка 1 часа.

2.2. Экологический мониторинг акваторий. В целях Федеральной целевой программы “Развитие гражданской морской техники” на 2009–2016 гг. по заказу МЧС РФ в ИО РАН в 2011 г. был разработан концептуальный проект комплексной системы экологического мониторинга акваторий, в котором профилограф “Аквалог” составляет ядро системы внутриводного мониторинга морской среды (рис. 1).

Помимо зонда-профилографа “Аквалог” в состав морской части комплекса также входит оборудование системы связи для передачи данных и команд управления, включая:

– подсистему подводной связи посредством бесконтактной индуктивной врезки в ходовой трос для незамерзающих акваторий или подсистему цифровой гидроакустической связи,

– подсистему связи с береговым/судовым центром приема и обработки данных – поверхностный телеметрический буй с модемами спутнико-

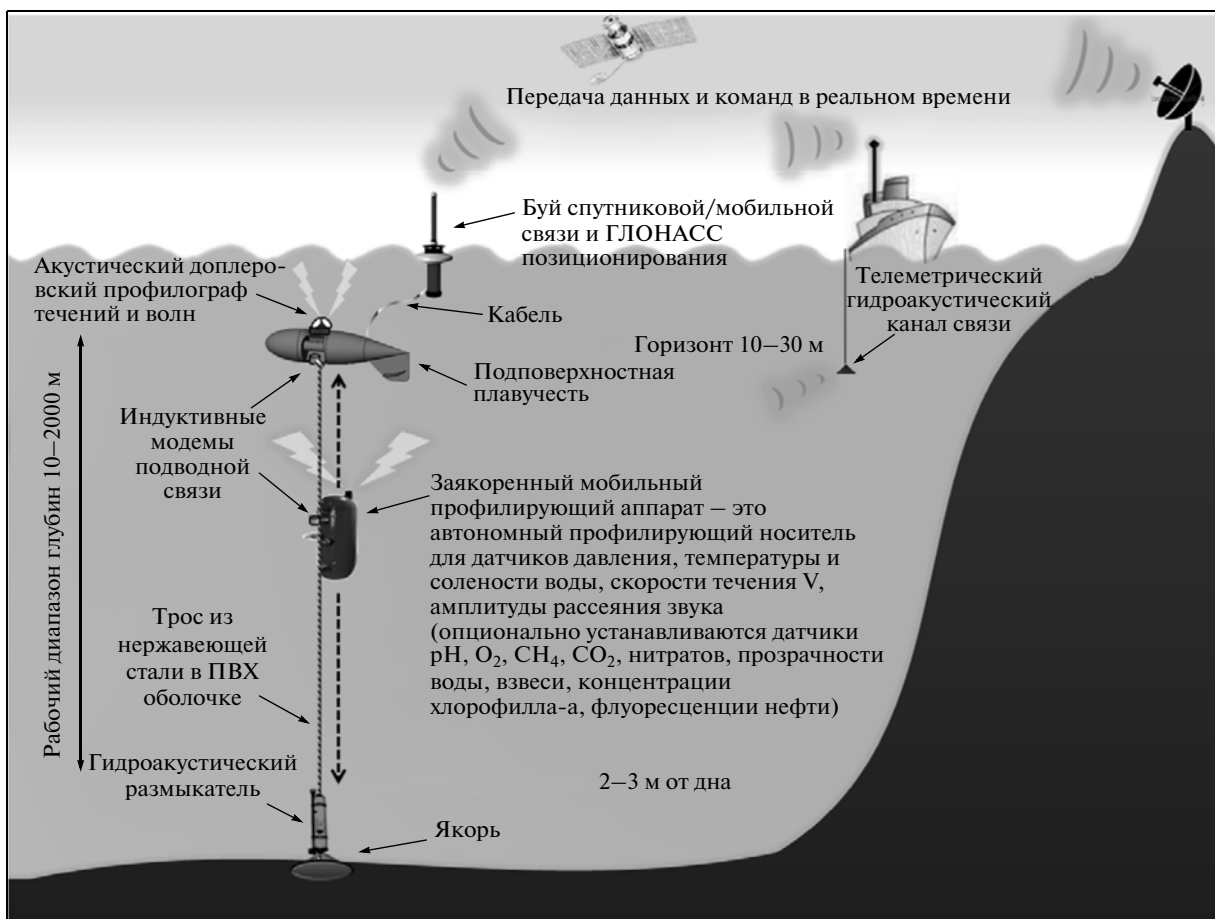


Рис. 1. Зонд-профилограф “Аквалог” в составе комплекса внутриводного мониторинга незамерзающих акваторий.

вой, УКВ и мобильной связи и передачи данных и телеметрической информации для незамерзающих акваторий или донный опто-волоконный кабель для акваторий, покрываемых льдом.

Береговые технические средства комплекса включают модуль приема и обработки данных и управления мониторингом.

Следует отметить, что технология автоматизированного профилирования на заякоренной буйковой станции превосходит требования действующих в РФ Правил контроля качества морских вод (ГОСТ 17.1.3.08-82 Охрана природы. Гидросфера.) о проведении измерений на фиксированных горизонтах, обеспечивая измерения вертикальных профилей параметров морской среды с разрешением порядка 1 м в толще вод от 5–10 м до придонного слоя. Вертикальные зондирования с помощью разрабатываемого комплекса проводятся не реже чем 1 раз в сутки, то есть чаще, чем измерения 2 раза в месяц по регламенту ГОСТ 17.1.3.08-82.

Преимущества предложенного подхода к мониторингу заключаются в нижеследующем:

- минимизируется риск потери оборудования за счет применения заякоренной буйковой систе-

мы с вертикально перемещающимся носителем измерительной аппаратуры вместо свободно дрейфующего зонда;

- автоматизированный мониторинг проводится непрерывно в заданном районе – накапливаются длительные ряды вертикальных профилей данных, требующихся для контроля характеристик морской среды в соответствии с ГОСТ 17.1.3.08-82;

- комплекс работает в оперативном режиме – передача данных измерений и получение команд управления осуществляются в режиме реального времени;

- комплекс адаптирован к конкретным задачам – модульность конструкции облегчает использование самых современных океанологических датчиков на носителе измерительной аппаратуры.

3. ОСОБЕННОСТИ ПРОФИЛОГРАФА “АКВАЛОГ”

Профилографы в составе буйковых систем, в которых буйреп служит ходовым тросом, позволяют существенно оптимизировать процесс измерений на океанологических станциях. Из произво-

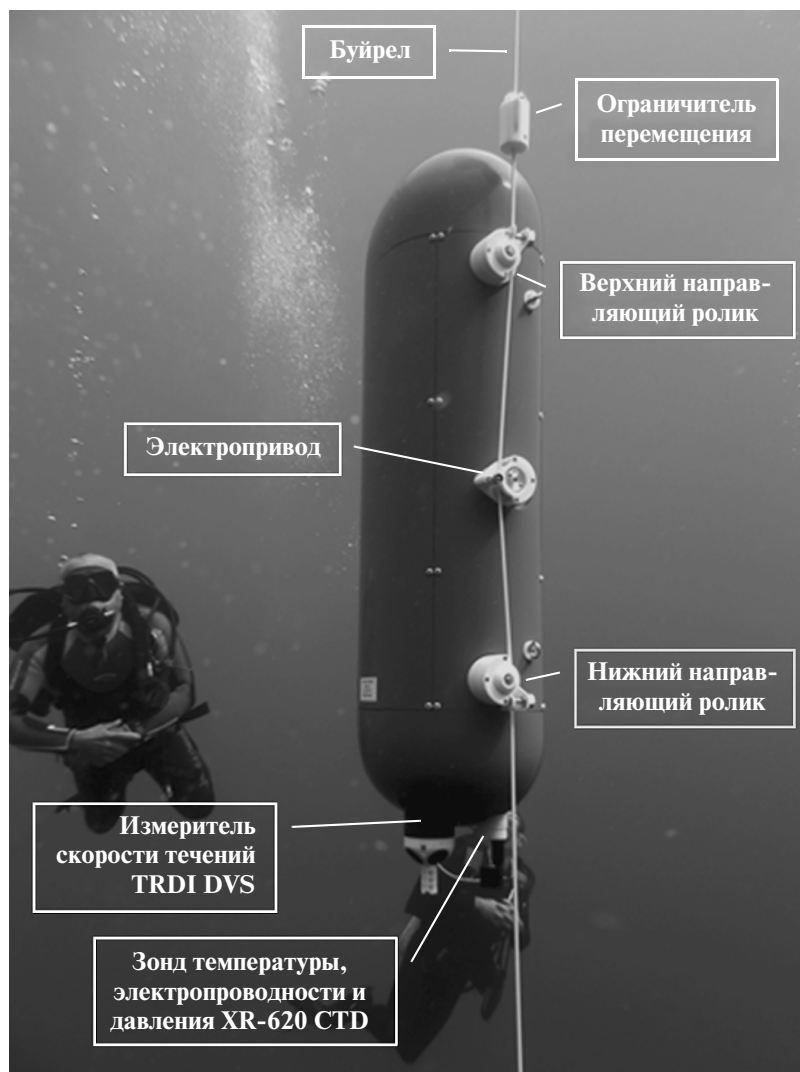


Рис. 2. Профилограф “Аквалог”, поднимающийся по буйрепу из морских глубин до верхнего ограничителя перемещения.

димых ныне к таким профилографам относятся SeaTramp PP2 (www.oceanorigo.com), McLane Moored Profiler MMP [7] и “Аквалог” [4, 11]. Вместо нескольких наборов приборов на стандартных гидрологических горизонтах в таких системах используется один комплект измерительных датчиков, что во много раз уменьшает затраты на проведение измерений. Профилограф за одну постановку может проводить непрерывные измерения в одной точке в течение сезона и более, в том числе в зимнее время подо льдом.

Зонд-профилограф “Аквалог” (рис. 2) представляет собой носитель, укомплектованный океанологическими измерительными датчиками и системой оперативной связи и управления [4]. Носитель автоматически со скоростью около 0.2 м/с передвигается по вертикально натянутому тросу на притопленной буйковой станции.

Микропроцессорная система управления зондом-профилографом “Аквалог” (рис. 3) обеспечивает следующие основные функции:

- ввод расписания профилирования с персонального компьютера (ПК), работающего в операционной среде MS Windows;
- ввод команд и вывод телеметрической информации на ПК;
- контроль режима перемещения;
- включение и выключение электродвигателя на заданных горизонтах в заданные моменты времени;
- сбор и накопление данных гидрофизических, биооптических и гидрохимических измерений во флэш-памяти.

При проектировании и изготовлении профилографа особое внимание было уделено стойкости изделия к агрессивным воздействиям морской среды, прежде всего к коррозии. Поэтому при из-

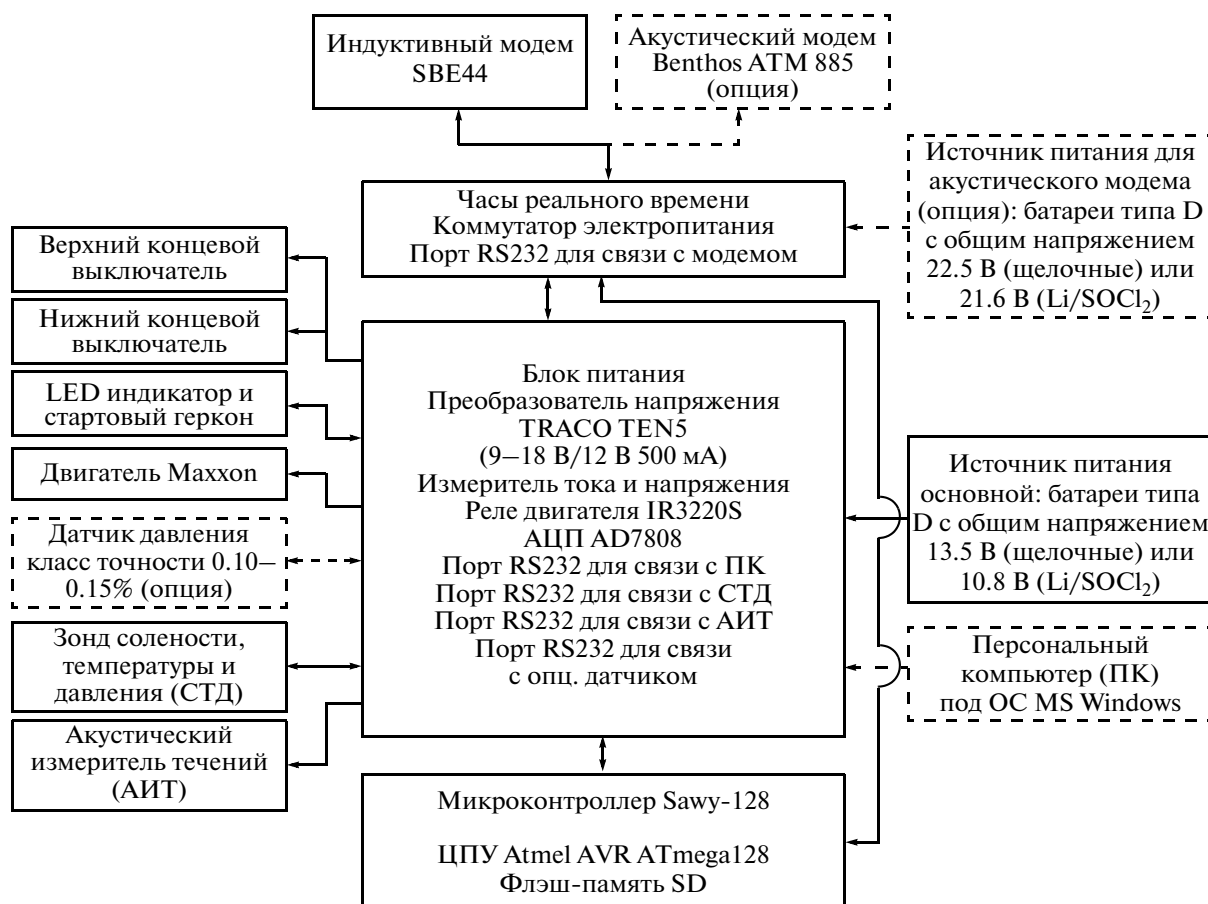


Рис. 3. Функциональная схема микропроцессорного устройства зонда-профилографа “Аквалог”.

готовлении профилографа были максимально использованы современные пластики и композитные материалы. Так, прочный корпус сделан из полиацетали, рама — из высокомолекулярного полиэтилена, обтекатель — из композитного материала с покрытием из гелкаута, также повсеместно используется полиамидный крепеж. Для профилирования на больших глубинах при высоком давлении применяется электродвигатель в герметичном титановом (производится с 2012 г.) корпусе с магнитной муфтой, а в качестве блоков плавучести — стеклянные сферы.

Зонд-профилограф “Аквалог” рассчитан на автономную работу в течение длительного времени с целью получения долговременных рядов данных. Например, в условиях умеренных течений (до 0.3 м/с) при постановке на изобате около 500 м, когда длина пути на один цикл профилирования составляет 1 км, емкости автономного блока литиевых батарей типа Д (сборка 72 шт) должно хватить на выполнение 1 цикла профилирования ежедневно в течение 1 года. Для коротких постановок применяются блоки щелочных батареек также типа Д. Спецификация профилографа “Аквалог” приведена в таблице.

Вертикальное разрешение и точность измерений зависят от используемых датчиков. При скорости перемещения профилографа 0.2 м/с вертикальное разрешение составляет, например, для давления — 0.05–0.15 дбар, для скорости течения — 0.6–1.8 м, для растворенного кислорода — 0.8–2.4 м. СТД-зонд TRDI Citadel CTD ES и более надежные зонды SBE 49 CTD и SBE 52MP CTD специально предназначены для измерений с подвижных платформ, они компактны, их легче интегрировать на зонде-профилографе; потребление энергии этими зондами минимизировано. Однако они не имеют дополнительных каналов, кроме канала датчика растворенного кислорода на зонде SBE 52MP CTD. Зонд RBR XR-620 и более громоздкие зонды CTD SBE 19plus CTD и Idronaut 316 CTD имеют 3–4 канала для установки дополнительных датчиков, например флуориметра и турбидиметра. Интеграция таких приборов позволяет решить задачу расширения приложений без увеличения числа измерительных каналов самого носителя “Аквалог”. Океанологические измерительные датчики включаются и выключаются микропроцессорным устройством профилографа. Данные акустических измерителей течений записываются в память только самих измерителей. После окончания поста-

Основные технические характеристики профилографа “Аквалог”

Характеристика	Значение
Скорость перемещения	0.15–0.3 м/с
Рабочий диапазон глубин	7–1000 м
Общая протяженность хода профилографа (без океано-логических датчиков) в стоячей воде	800 км
Энергопотребление:	
Номинальное входное напряжение	10.5–13.5 В
Максимальная потребляемая мощность в процессе профилирования (без океано-логических датчиков)	2–6 Вт
Потребляемая мощность в режиме засыпания	0.006 Вт
Внешний интерфейс	RS 232
Весогабаритные характеристики:	
Габаритные размеры	1.45 × 0.35 × 0.65 м
Масса в воздухе (без океано-логических датчиков)	68 кг
Плавучесть в воде	±3 Н
Океано-логические датчики:	
– зонды температуры, электропроводности и давления	SBE 52 MP CTD, SBE 49 CTD, SBE 19plus CTD, RBR XR-620 CTD, Idronaut 316 CTD, TRDI Citadel CTD ES
– датчики растворенного кислорода, рН-метры, еН-метры	AANDERAA 4330F, SBE 43 DO, Idronaut DO, Idronaut Redox, Idronaut pH, SBE 27 pH
– флуорометры, турбидиметры, прозрачномеры	Sea Point, WET Labs ECO FLBBCD Triplet, Wet Lab Transmissometer
гидрохимические датчики нитратов, фосфатов, силикатов, железа (II), метана	Satlantic SUNA, SubChem APNA, Franatech METS
– акустические измерители скорости течений и обратного акустического рассеяния	Nortek Aquadopp, TRDI Doppler Volume Sampler, AQUATEC AQUAScat 1000

новки данные измерений считываются с помощью персонального компьютера.

В целях экологического мониторинга акваторий зонд-профилограф “Аквалог” доукомплектовывается специализированными приборами, например датчиками CH₄ Franatech METS и нитратов Satlantic SUNA, а также измерителем растворенных неорганических нитратов, фосфатов, силикатов, железа (II) SubChem APNA. Интересен опыт работы профилографа с 4-х канальным измерителем обратного акустического рассеяния AQUATEC AQUAScat 1000 для решения задач определения концентрации и состава внутриводной взвеси. Большие возможности комплектования измерительной аппаратурой делают систему гибкой, адаптируемой под различные задачи.

В части передачи данных и телеметрической информации профилограф “Аквалог” может комплектоваться либо подводным индуктивным модемом SBE IMM, либо цифровыми гидроакустическими модемами Benthos ATM 885 или Evologics Hydro-acoustic Modems S2CR 7/17 [4]. С профилографом опционально поставляется буй, с индуктивным модемом или гидроакустическим модемом и аппаратно-программными средствами мо-

бильной связи GSM/GPRS, спутниковой связи ARGOS или IRIDIUM, а также УКВ радиосвязи по выбору заказчика. Профилограф “Аквалог” по существу является океано-логической обсерваторией, позволяющей проводить мониторинг в режиме реального времени.

4. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЗОНДА-ПРОФИЛОГРАФА “АКВАЛОГ”

В 2010–2012 гг. зонд-профилограф “Аквалог” был использован для проведения научных исследований в Балтийском, Карском, Красном, Мертвом, Средиземном, Черном и Японском морях [5, 11]. Исследования проводились в различных климатических условиях, например в Японском море в зимних условиях в феврале 2010 г. в акватории частично покрытой льдом, когда температура воды опускалась ниже –1°C. Важнейшими с точки зрения проверки живучести профилографа при высочайшей солёности воды 300–400 практических ед. стали экспериментальные работы в Мертвом море в октябре 2012 г., которые продемонстрировали лучшие качества прибора по коррозионностойкости и надежности.

Постановки притопленных буйковых станций, оснащенных профилографами, часто выполнялись с маломерных плавсредств, например, с помощью катера длиной около 12 м водоизмещением 22 т в глубоководной части акватории Черного моря. Несмотря на то, что в районе постановок временами наблюдаются сильные штормы, мы стремились ставить буйковые системы так, чтобы притопленные буи располагались как можно ближе к поверхности моря. Например, даже в осенних условиях в Черном море, когда штормы достигали 6 баллов, притопленные буи выставлялись на горизонтах 15–20 м. Это позволяло получить важную информацию об отклике моря на атмосферные воздействия.

4.1. Функционирование профилографа “Аква-лог” по данным натурального эксперимента в Черном море в 2011 г. Притопленная буйковая постановка с профилографом “Аква-лог” была осуществлена с 26 июня по 22 августа 2011 г. в точке 44°29.44' с.ш., 37°58.38' в.д. на изобате 265 м на траверзе Геленджикской бухты в шельфово-склоновой зоне северо-восточной части Черного моря. Профилограф автоматически выполнял циклы профилирования между горизонтами 15 м и 200 м ежедневно в сроки 00:00, 03:00, 06:00, 08:00, 10:00, 15:00, 18:00, 21:00. В каждый срок профилограф опускался с парковочного горизонта 100 дбар в сероводородную зону до отметки 200 дбар, выстаивался 3 мин, затем поднимался до горизонта 15 м, выстаивался 15 мин и спускался до горизонта 100 дбар. На выполнение 1 цикла профилирования уходило примерно 52 мин. За время постановки профилограф выполнил 458 таких циклов, пройдя в общей сложности около 170 км.

До 2011 г. включительно на профилографе применялся электропривод, все механические детали которого (кроме подшипников) были изготовлены из нержавеющей стали.

Профилограф был оснащен STD-зондом Idropaut 316 STD с датчиками растворенного кислорода, редокс и рН, а также акустическим доплеровским измерителем скорости течений Nortek Aquadopp с 2-осевым инклинометром и компасом. Благодаря ругулярным спускам в сероводородную зону профилограф не был подвержен биообрастанию, а датчики температуры и электропроводности оставались в отличном рабочем состоянии весь срок постановки.

Прибор был сбалансирован перед постановкой так, чтобы его вес в воде был равен весу вытесненной им воды на горизонте 200 м. Учитывая, что перепад плотности между поверхностными водами и горизонтом 200 м менялся в пределах от 2.6 г/кг в июне до 6 г/кг в середине августа, а объем профилографа с датчиками составлял около 80 л, легко подсчитать, что в условиях верхнего квазиоднородного слоя моря профилограф был перегружен на величи-

ну от примерно 0.2 кг в начале работы буйковой станции до примерно 0.5 кг к концу постановки.

Профилограф “Аква-лог” надежно работал даже при сильных наклонах буйрепа до 15–16°. Такие наклоны были связаны со значительными скоростями течений. Максимальные скорости морских течений, при которых профилограф продолжал устойчиво сканировать водную толщу, достигали примерно 0.75 м/с.

В режиме зондирования потребление энергии профилографом было сравнительно небольшим. Отметим, что за 2 месяца постановки механические детали профилографа приработались: по данным измерений в слое 180–200 м, наименее подверженному воздействию течений, потребление энергии снизилось на 0.06 Вт как при подъеме, так и при спуске. На рис. 4 представлены данные о потреблении энергии двигателем профилографа (W) в зависимости от глубины и скорости течений при движении вниз.

Из рис. 4 хорошо видно, что потребление энергии на перемещение профилографа вниз при малых скоростях течений до 0.03 м/с, как правило, не превышало 1.5 Вт, составив в среднем 1.1 Вт. По данным измерений в верхнем слое моря, лежащим между изопикнами $\sigma_T = 13.5–14$ усл. ед. (глубина залегания этого слоя колебалась в диапазоне от 15–30 м до 40–60 м), при усилении горизонтального переноса до 0.7 м/с зависимость потребления энергии на перемещение W от скорости течений $|U|$ аппроксимируется полиномом 2-й степени: $W = k_1 U^2 - k_2 |U| + k_3$, где $k_1 = 3.6$ Вт · с²/м², $k_2 = 0.045$ Вт с/м, $k_3 = 1.1$ Вт.

Под действием течений буйреп наклоняется, и на профилограф начинает действовать составляющая выталкивающей силы, пропорциональная наклону прибора. Движение затрудняется вследствие наличия присоединенной массы воды, которая какое-то время сохраняется под обтекателем после начала движения. Усиление сопротивления обтеканию потоком воды, как известно, пропорционально квадрату скорости потока и приводит к увеличению трения на ролике профилографа.

По экспериментальным данным, полученным летом 2011 г., спуск профилографа был существенно затруднен при сильных течениях из-за суммарного действия силы сопротивления и несколько уменьшенного веса прибора вместе в весом присоединенного объема воды (в полостях внутри обтекателя находилась относительно легкая вода). При увеличении скорости течения до 0.7 м/с затраты энергии на перемещение профилографа вниз достигали 3 Вт. “Броски” потребления энергии свыше 3 Вт были зарегистрированы в основном при старте электропривода.

При движении вверх в слое $\sigma_T = 13.5–14$ усл. ед. потребление энергии W не зависело от скорости течения (рис. 4), то есть действие выталкивающей силы на течении было уравновешено увеличением

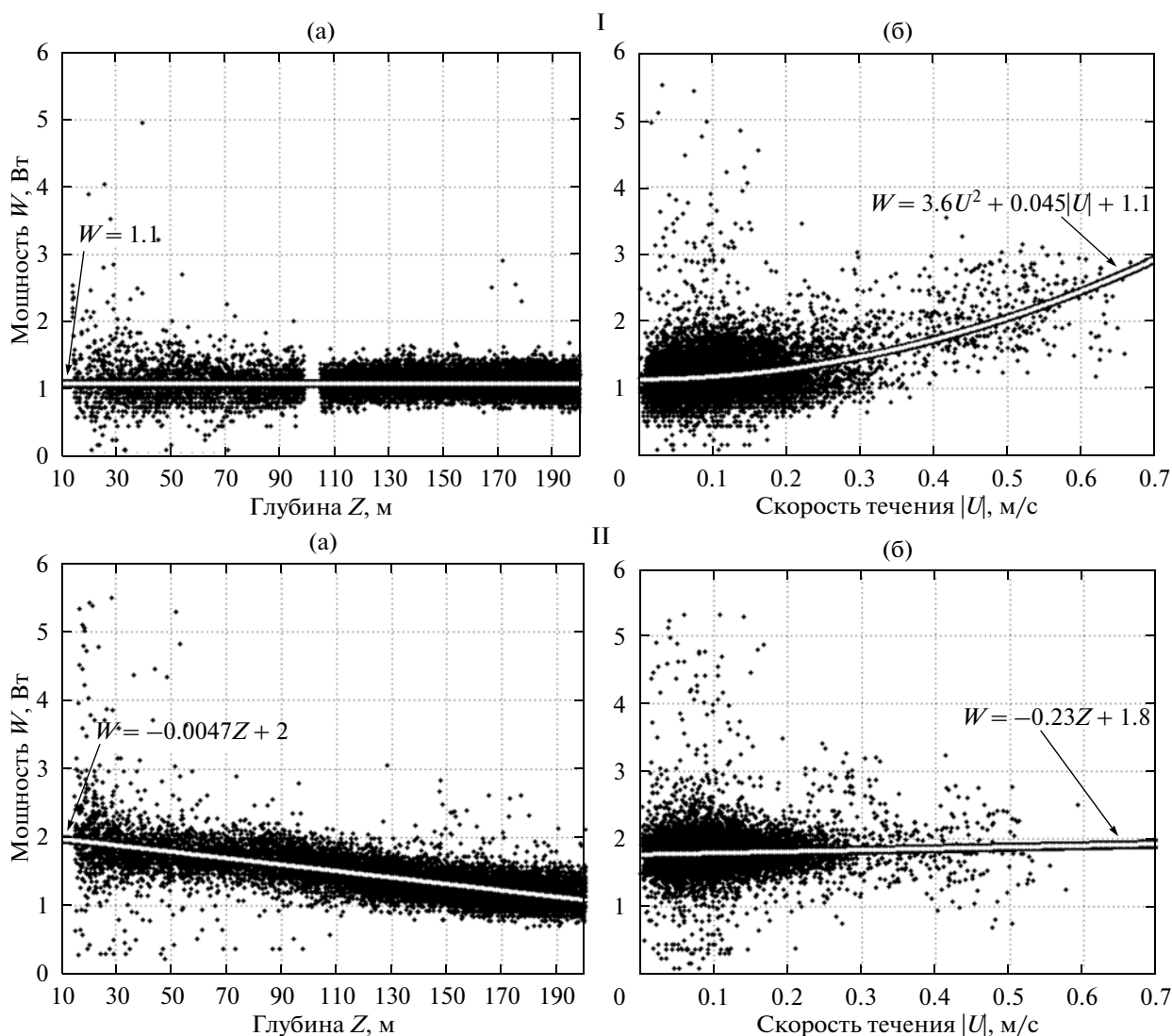


Рис. 4. Потребление энергии на перемещение профилографа: I – вниз; II – вверх.

(а) – при малых скоростях течений до 0.03 м/с; (б) – в зависимости от скорости течений в слое между изопикнами $\sigma_T = 13.5$ –14 усл. ед., двойная линия – полиномиальная аппроксимация.

силы тяжести из-за эффекта присоединенной массы воды.

Из рис. 4 следует, что при отсутствии течений средняя потребляемая мощность при выполнении одного цикла зондирования (движения вниз и вверх) составила 1.30 Вт. При этом достаточно было иметь дефицит плавучести всего 2 Н, т.е. эквивалента примерно 0.25% от объема профилографа в 80 л, чтобы уменьшить затраты энергии на перемещение вниз примерно на 15%. Оценки показывают, что дефицит плавучести в 5 Н был бы не достаточен, чтобы при опускании профилографа компенсировать составляющую силы выталкивающей силы под воздействием течений. Немаловажно, что при движении вниз прибор отстаивался на промежуточном горизонте 100 м минимум

1 час, в течение которого вода под обтекателем полностью замешалась.

4.2. Научные результаты эксперимента в Черном море в 2011 г. С помощью профилографа “Аквалог” в фиксированных географических точках были впервые получены длительные временные ряды мультипараметрических тонкоструктурных вертикальных профилей ключевых параметров морской среды: скорости течений, термohалинных характеристик, растворенного кислорода, pH воды, акустического рассеяния на планктоне и взвесьях.

Особенно интересны тонкоструктурные измерения скорости течений и звукорассеивающих слоев. Так, в 2011 г. в Черном море с помощью профилографа “Аквалог” и размещенного на нем доплеровского измерителя Aquadopp были впервые получены вертикальные профили скорости тече-

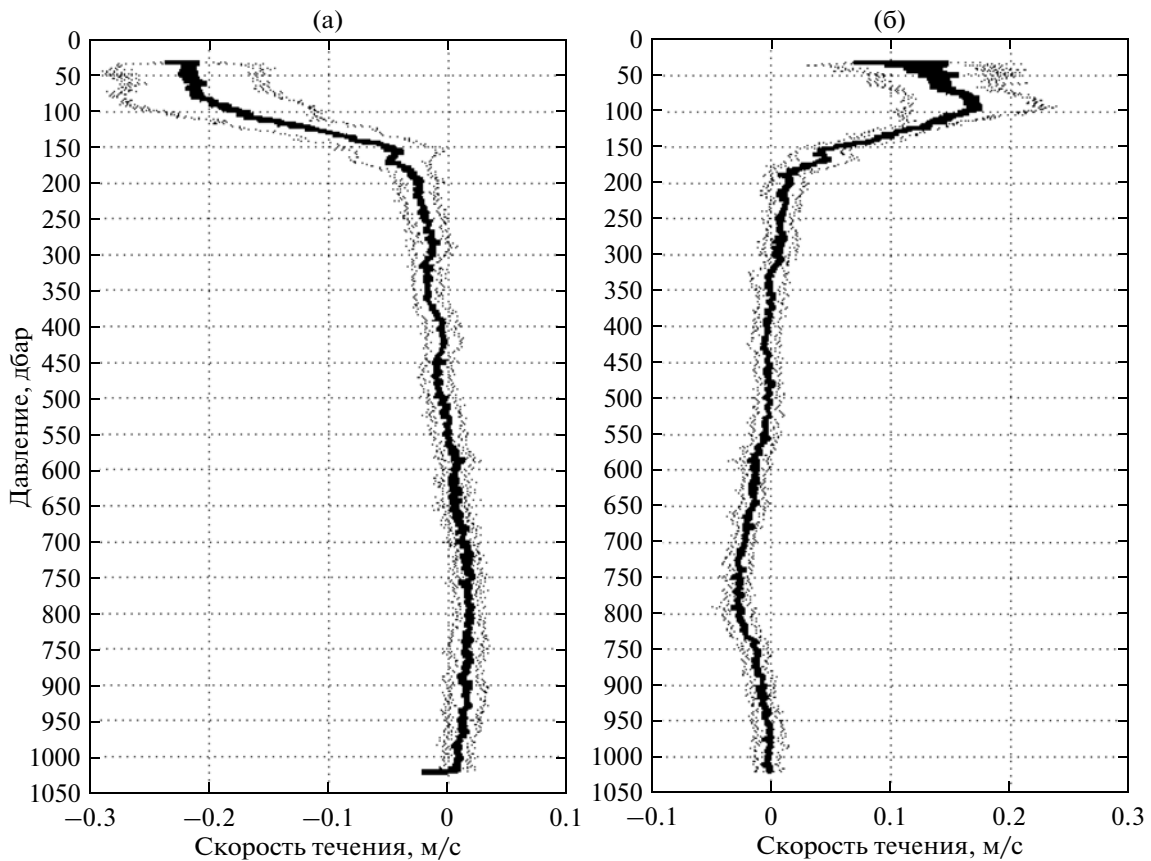


Рис. 5. Вертикальные тонкоструктурные профили зонального (а) и меридионального (б) компонент скорости течений по данным глубоководных измерений с помощью профилографа “Аквалог” 17–19.06.2011 г. в северо-восточной части Черного моря. Сплошные линии – профили средних значений, пунктирные линии – среднеквадратические отклонения.

ний с разрешением 1 м от приповерхностного слоя до придонного (1020 м). Измерения проводились 17-19 июня на траверзе Геленджикской бухты за свалом глубин в точке 44°28.28' с.ш. 37°56.24' в.д.

На рис. 5 представлены результаты этих измерений по данным 14 циклов спуск/подъем профилографа “Аквалог”. В верхних 100 метрах моря доминирует северо-западный перенос со скоростями до 0.27 м/с, соответствующий Основному черноморскому течению. В слое 100–150 м происходит резкое торможение северо-западного потока, в диапазоне глубин от 200 до 400 м течения отсутствуют, а еще глубже между горизонтами 500 и 950 м наблюдается глубинное юго-восточное противотечение, ядро которого (скорость до 0.03 м/с) залегает в слое 700–850 м.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами доработана технология [4] автоматического зондирования водной толщи с помощью носителя с полезным грузом океанологических датчиков, перемещающегося по вертикально натянутому буйрепу между притопленной плавучестью и якорем.

Практическое применение разработки в первую очередь связано с оперативным контролем за внутриводными загрязнениями, потенциально опасными природными и антропогенными процессами в морях Российской Федерации. Разработка также предназначена для обеспечения круглогодичного подледного мониторинга в Арктике.

Нами изготовлена малая серия зондов-профилографов “Аквалог”. Рабочие режимы профилирования испытаны при низкой температуре воды до -1°C , солёности воды до 400 практических ед. и в условиях глубоководных (до 1000 м) постановок. Испытания показали, что профилограф может выполнять циклы спуск/подъем в условиях довольно сильных морских течений, скорость в которых достигает 0.7–0.8 м/с, когда буйреп наклонен на $10-15^{\circ}$.

С помощью зондов-профилографов “Аквалог” начаты систематические измерения вертикальных тонкоструктурных профилей ключевых параметров морской среды, в том числе в Балтийском и Черном морях. В отличие от традиционных буйковых постановок с размещением приборов на фиксированных горизонтах, новый подход позволяет проводить непрерывные измерения вертикальных

профилей характеристик состояния морской среды с тонкоструктурным вертикальным разрешением. Летом 2011 г. в глубокой части бассейна российского сектора Черного моря обнаружено противотечение в 400-метровом слое воды под Основным черноморским течением.

Авторы благодарят С.С. Низова (ИО РАН), В.В. Кременецкого (ИО РАН) и Д.М.Соловьева (МГИ НАНУ) за помощь в работах на Черном море в 2011 г. Академика РАН Г. В. Смирнова, который поддержал проект и дал много полезных рекомендаций.

Работа выполнена по проектам РФФИ №11-05-90302-Абх_а, №10-05-01091-а, а также по Целевой научно-технической программе “Разработка уникальных научно-исследовательских приборов и оборудования для учреждений РАН”. ООО “Аквалог”, ФГУП ОКБ ОТ РАН и Южное отделение ИО РАН (г. Геленджик) оказали поддержку и помощь в организации и проведении натурного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монин А.С., Каменкович В.М., Корт В.Г. Изменчивость Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 261 С.
2. Островский А.Г. Обзор автономных мобильных океанологических профилографов // Четвертая всероссийская научно-техническая конференция “Технические проблемы освоения Мирового океана” (3–7 октября 2011 г.). Материалы конференции. Владивосток: Учреждение РАН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, 2011. С. 145–152.
3. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Деревнин В.А. и др. Заякоренная автоматическая измерительная система “Аквазонд” для вертикального профилирования морской среды // Океанология. 2008. Т. 48. № 2. С. 1–10.
4. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Иванов В.Н. и др. Заякоренная профилирующая океанская обсерватория // Подводные исследования и робототехника. 2009. №2/8. С. 50–59.
5. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А. и др. Новые результаты мультидисциплинарных исследований с использованием заякоренного профилографа Аквалог // Четвертая всероссийская научно-техническая конференция “Технические проблемы освоения Мирового океана” (3–7 октября 2011 г.). Материалы конференции. Владивосток: Учреждение РАН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, 2011. С. 153–159.
6. Флинт М.В. Вертикальное распределение массовых видов мезопланктона в связи со структурой поля кислорода // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря / Ред. Виноградов М.Е., Флинт М.В. М.: Наука, 1989. С. 187–212.
7. Doherty K.W., Frye D.E., Liberatore S.P., Toole J.M. A moored profiling instrument // J. Atmos. Oceanic Technol. 1999. V. 16. P. 1816–1829.
8. Holliday D.V., Greenlaw C.F., Donaghay P.L. Acoustic scattering in the coastal ocean at Monterey Bay, CA, USA: Fine-scale vertical structures // Continental Shelf Research. 2010. V. 30. N. 1. P. 81–103.
9. Mutlu E. Diel vertical migration of *Sagitta setosa* as inferred acoustically in the Black Sea // Marine Biology. 2006. V. 149. № 3. P. 517–523.
10. Ostrovskii A.G., Zatssepina A.G. Short-term hydrophysical and biological variability over the northeastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys // Ocean Dynamics. 2011. V. 61. № 6. P. 797–806.
11. Ostrovskii A.G., Zatssepina A.G., Shvoev D.A., Soloviev V.A. Underwater anchored profiler Aqualog for ocean environmental monitoring // Advances in Environmental Res. 2010. V. 4. P. 201–218.
12. Svetlichny L.S., Hubareva E.S., Erkan F., Gucu A.C. Physiological and behavioral aspects of *Calanus euxinus* females (Copepoda: *Calanoida*) during vertical migration across temperature and oxygen gradients // Marine Biology. 2000. V. 137. № 5. P. 963–971.
13. Sullivan J.M., McManus M.A., Cheriton O.M. et al. Layered organization in the coastal ocean: An introduction to planktonic thin layers and the LOCO project (Editorial) // Continental Shelf Research. 2010. V. 30. № 1. P. 1–6.
14. Van Leer J., Duing W., Erath R. et al. The Cyclosonde: An unattended vertical profiler for scalar and vector quantities in the upper ocean // Deep-Sea Res. 1974. V. 21. № 5. P. 385–400.

Autonomous System for Vertical Profiling of the Marine Environment at a Moored Station

A. G. Ostrovskii, A. G. Zatssepina, V. A. Soloviev, A. L. Tsibulsky, D. A. Shvoev

This paper presents the new results of the research and development project on the moored profiler Aqualog aiming at multidisciplinary studies and ecological monitoring of the marine environment. The data on the profiler operation are summarized based upon the field experiments in the northeastern Black Sea in 2011. Important scientific result obtained by using the profiler during the experiments was the discovery of the countercurrent below the Black Sea Rim Current in the layer between 500 m and 900 m depth.