# НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПРИБРЕЖНОЙ ЭКСПЕДИЦИИ «ЧЕРНОЕ МОРЕ-2017» НА МНИС «АШАМБА»





## ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН

# НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПРИБРЕЖНОЙ ЭКСПЕДИЦИИ «ЧЕРНОЕ МОРЕ-2017» НА МНИС «АШАМБА»

Ответственные редакторы:

Зацепин А.Г. Куклев С.Б.

УДК 504.42 (Мировой Океан) ББК 26.38 Н47

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПРИБРЕЖНОЙ ЭКСПЕДИЦИИ «ЧЕРНОЕ МОРЕ - 2017» НА МНИС «АШАМБА» - М.: Научный мир, 2018. 172 с.: илл.

Научные редакторы: д.ф.-м. наук Зацепин А.Г., к.г.н. Куклев С.Б.

Представлены результаты комплексной экспедиции "Черное море - 2017", проведенной в прибрежной шельфовой зоне северо-восточной части Черного моря. Выполненные работы включали физическое, химическое, геологическое и биологическое направления фундаментальных исследований и стали продолжением цикла многолетних исследований, которые проводятся ИО РАН с 1999 г.

Комплексная научная экспедиция «Черное море – 2017» проведена в рамках государственного задания ИО РАН. Материалы исследований были использованы для выполнения работ по базовым темам  $N^{o}N^{o}$  0149-2018-0002, 0149-2018-0003, 0149-2018-0004, 0149-2018-0005, 0149-2018-0007, 0149-2018-0010, 0149-2018-0013. Кроме того, исследования проводились в рамках и при поддержке Программ фундаментальных исследований Президиума РАН 1.49 и 1.50 (0149-2018-033/6, 0149-2018-0022), грантов РНФ  $N^{o}$  14-27-00114 «Седименто-биогеохимические исследования морей европейской части России (рассеянное осадочное вещество, донные осадки, диагенез) и  $N^{o}$  14-50-00095 «Мировой океан в XXI веке: климат, экосистемы, ресурсы, катастрофы», темы НИР ГЗ ЮНЦ РАН «Современное состояние и многолетняя изменчивость прибрежных экосистем южных морей России» ( $N^{o}$  госрегистрации 01201363187), индивидуальным грантам РФФИ  $N^{o}N^{o}$  15-05-08659, 15-05-04229, 16-45-230781, 17-05-41041 pго, 17-05-00381, 17-05-00799.

ISBN: 978-5-91522-472-7

# Оглавление

Предисловие
Список сокращений9
Введение
Глава 1. Изучение мезо- и субмезомасштабных гидрофизических процессов на
шельфе и континентальном склоне дистанционными и контактными
методами16
Глава 2. Экологический мониторинг пелагического сообщества
Глава 3. Анализ концентраций загрязняющих веществ (нефтепродуктов,
фенолов, СПАВ, ХОП, ПАУ, тяжелых металлов и др.) в водной толще
и в донных осадках Геленджикской и Голубой бухт67
Глава 4. Мониторинг прибрежных донных сообществ79
Глава 5. Азовские воды в Черном море
Глава 6. Исследование биооптических характеристик поверхностного слоя131
Глава 7. Исследования кислородного режима в придонном слое вод и реакции
зообентоса на условия гипоксии/аноксии в зоне контакта
черноморского хемоклина с континентальным склоном149
Глава 8. Испытание новых автономных зондирующих аппаратов
Глава 9. Морская метеорологическая станция
Заключение

## Предисловие

Институтом океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН, г. Москва) совместно с Южным отделением Института (ЮО ИО РАН, г. Геленджик) проведена комплексная научная экспедиция на МНИС БМП-74 «Ашамба» в марте-декабре 2017 г. продолжительностью 90 суток в территориальных водах российской части Черного моря. Экспедиционные исследования были направлены на изучение фундаментальных вопросов взаимодействия экосистем шельфовой зоны и глубоководных районов бассейна, а также на анализ состояния черноморской экосистемы после холодной зимы, последовавшей за тремя относительно теплыми для региона зимними сезонами 2013-2016 гг. Выполненные работы включали физическое, химическое, геологическое и биологическое направления фундаментальных исследований в Черном море и стали продолжением цикла многолетних исследований, начатых в 1999 г. В экспедиционных работах приняло участие более 60 сотрудников Института и его Южного отделения и более 15 специалистов и студентов из других научных и учебных организаций: МГУ (г. Москва), ФГБНУ ИМБИ (г. Севастополь), ФГБНУ «ВНИРО» (г. Москва), ИАЗ ЮНЦ РАН (г. Ростовна-Дону), ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (г. Санкт-Петербург), РГГМУ (г. Санкт-Петербург). Работы выполнялись в несколько этапов в течение всего года. На каждом этапе решалась конкретная научная задача в соответствии с Программой комплексной научной экспедиции «Черное море – 2017».

При разработке программы исследований учитывались региональные особенности бассейна. Черное море является водоемом с весьма тонким деятельным слоем. Лишь в верхних 100-150 метрах воды есть кислород и имеются благоприятные условия для жизнедеятельности организмов. Основная толща вод – от 150 м и до дна (приблизительно 2000 м) – представляет собой сероводородную среду, населенную лишь бактериями и археями. Такие специфические условия определяются наличием резкого пикно-халоклина, затрудняющего вертикальное перемешивание и транспорт кислорода в глубинный слой Черного моря. Очевидно, что небольшая толщина деятельного слоя делает экосистему вод Черного моря чрезвычайно чувствительной к изменениям климатических условий, а также к антропогенному воздействию. Так, например, потепление регионального климата и связанное с ним ослабление интенсивности поля ветра и конвективного перемешивания в зимний сезон должно приводить к дальнейшему уменьшению толщины кислородного слоя и, соответственно, к подъему зоны сероводородного заражения. Все это может крайне негативно отразиться на функционировании черноморской экосистемы в целом. Однако достоверно предсказать реакцию экосистемы на климатические изменения в настоящее время не представляется возможным. Поэтому систематическое изучение влияния изменяющихся климатических условий в регионе на экосистему Черного моря является важнейшей задачей современного комплексного научного исследования.

Эта задача в рамках данной экспедиции решается путем проведения систематического круглогодичного экологического мониторинга, выполняемого на судовом разрезе от берега до глубины 1500 м на траверзе Голубой бухты.

С другой стороны, усиление антропогенного стресса, обусловленного в основном промышленно-хозяйственной и рекреационной активностью на берегу и в прибрежных районах моря, увеличивает загрязнение и эвтрофикацию вод шельфовой зоны и также может приводить к изменениям на экосистемном уровне. При этом, в условиях сильной вертикальной плотностной стратификации, степень антропогенного воздействия на экосистему шельфовой зоны зависит от интенсивности речного (берегового) стока, поступающего в российский сектор Черного моря как непосредственно из малых и средних рек российского побережья, так и из Азовского моря через Керченский пролив, и процессов горизонтального обмена вод шельфа и глубоководной части бассейна. Так, большой речной сток и связанный с ним поток загрязняющих веществ, и низкий уровень горизонтального обмена, способствующего вентиляции прибрежных вод и их очистке от загрязнений, будет усиливать негативное влияние антропогенного стресса на шельфе. По существующим представлениям горизонтальный водообмен в прибрежной зоне моря происходит в основном за счет субмезомасштабных вихревых структур. Таким образом, изучение субмезомасштабной вихревой динамики и ее влияния на процессы трансшельфового обмена в Черном море, а также процессов распространения, трансформации вод речного стока и связанных с ним загрязнений на морском шельфе является важной научной и практической задачей.

Вселение в Черное море и массовое размножение в конце 80-х годов прошлого века гребневика *Мпетіорзіз leidyi*, питающегося зоопланктоном и личинками рыб, наряду с эвтрофикацией вод за счет увеличения поступления минеральных веществ в море, обусловленного химизацией сельского хозяйства, привело черноморскую экосистему к глубокой деградации. В конце 1990-х годов положение несколько выправилось благодаря вселению другого гребневика – *Вегое ovata*, являющегося хищником в отношении *Мпетіорзіз leidyi*, после чего влияние последнего на зоопланктон уменьшилось. Также в 1990-е годы уменьшилась и химизация сельского хозяйства и связанное с ней поступление минеральных веществ, и черноморская экосистема начала восстанавливаться. Однако в любой момент имеется вероятность появления новых вселенцев, способных оказать негативное влияние на биоту Черного моря. Потепление регионального климата (более чем на два градуса Цельсия за последние 25 лет) способствует продвижению биологических видов с юга на север. В силу этого постоянное получение данных о динамике популяций, заселяющих прибрежную зону моря, является важной задачей фундаментальных и прикладных черноморских исследований.

Актуальной задачей исследования также является получение характеристик пространственно-временной изменчивости цветения кокколитофоридовых водорослей и выявление причин наблюдаемой изменчивости, а также усовершенствование алгоритма расчета содержания хлорофилла и взвеси в приповерхностном слое по спутниковым данным. Черное море – одно из мест наиболее интенсивного цветения кокколитофорид в Мировом океане, которое является одним из механизмов связывания углерода в верхнем слое воды и его последующего захоронения в донных осадках вследствие оседания клеток умерших водорослей.

В конце XX – начале XXI в. произошли кардинальные перестройки донных сообществ Черного моря, выражающиеся в падении разнообразия, сдвиге нижней границе обитания макрофитобентоса на меньшие глубины, смене доминантов и колебаниях численности характерных видов макрозообентоса. Возможной причиной этих изменений явилось массированное и многофакторное внешнее воздействие: интенсивная эвтрофикация вод в 1970-1980-х годах, вызвавшая перестройки в пелагических сообществах и вселение чужеродных видов. В настоящее время эта перестройка еще не закончилась. Поэтому систематические исследования донных сообществ в рамках прибрежной черноморской экспедиции осуществлялись на протяжении ряда последних лет, в том числе и в 2017 г.

В 2017 году продолжены работы по исследованию современного состояния донных зооценозов в пределах слоя черноморского редокс-хемоклина. Исследованиями по-казано, что зообентосные формы присутствуют на глубинах ниже перманентного положения пикно-халоклина, куда кислородосодержащие воды проникают лишь эпизодически. При этом, на глубине 215 м обнаружены только одноклеточные организмы – инфузории. А в зоне глубинного максимума численности зообентоса (гл. 238 м) обнаружено разнообразное мейобентосное сообщество, которое представлено в том числе многоклеточными гидробионтами (круглые черви, ракообразные). Остается открытым вопрос об обеспеченности кислородом или, возможно, альтернативными акцепторами электронов для дыхания этого глубоководного скопления эукариотных организмов – как одноклеточных, так и многоклеточных. Этот природный феномен является новым для науки и требует дальнейших специальных исследований.

Важным элементом программы исследований является поддерживание и дальнейшее развитие черноморского полигона ИО РАН (сокращенно – Полигон «Геленджик», см. сайт http://polygon.ocean.ru/index.php), созданного в 2010-2013 гг. на базе Южного отделения в Геленджикском районе Черного моря. Основу полигона составляют автоматизированные измерительные станции наблюдений. Информация, получаемая на Полигоне, позволяет: а) существенно поднять уровень исследования субмезомасштабной и короткопериодной изменчивости динамики вод шельфа, ее реакции на атмосферные воздействия (норд-осты, шторма), мезомасштабную и субмезомасштабную изменчивость течений в глубоководной зоне моря; б) выполнить проверку адекватности использования спутниковых данных для расчета концентрации хлорофилла «а» на основе сопоставления результатов расчета с данными измерений на Полигоне; в) отработать методики измерения и оперативной передачи данных; г) провести испытание но-

вых измерительных и вспомогательных устройств; д) обеспечить квазинепрерывными рядами гидрофизических данных других участников программы экспедиции и, прежде всего, участников программы мультидисциплинарного судового экомониторинга.

Полигон является экспериментальной площадкой отработки средств и методов натурных океанографических исследований. При этом большое значение придается развитию средств и методов оперативной океанографии. В 2017 году на полигоне продолжены испытания разработанной в ИО РАН станции автоматического зондирования водной толщи (АЗВТ), оснащенной модемом для передачи данных по мобильной связи. Станция с программируемой периодичностью осуществляет зондирование водной толщи в процессе подъема плавучего модуля от придонного слоя до поверхности моря, измеряя при этом вертикальное распределение гидрофизических и биооптических параметров. При выходе модуля на поверхность осуществляется оперативная передача данных на интернетовский сервер.

В октябре 2017 г. на полигоне начаты регулярные измерения метеорологических параметров в шельфовой зоне Черного моря. Автоматическая метеостанция размещена на высоте 6 м над уровнем моря на заякоренном навигационном морском буе, установленном в створе Геленджикской бухты на удалении 7.5 км от берега. Данные измерений температуры воздуха, скорости и направления ветра и атмосферного давления в режиме реального времени каждые 10 минут передаются по радиоканалу связи на береговой сервер и далее размещаются на специально созданной странице интернета. Текущая информация о состоянии приводного слоя атмосферы в районе постановки буя доступна любому зарегистрированному пользователю. Получаемые данные измерений не искажены орографическими особенностями местности, что характерно практически для всех метеостанций Кавказского побережья Черного моря. Использование данных автоматических морских метеоизмерений позволит повысить точность расчетов океанологических параметров, в частности напряжения трения ветра на поверхности моря, а также послужит развитию средств и методов черноморской оперативной океанографии.

Новым шагом в развитии дистанционных гидрофизических измерений стало проведение «радарного» эксперимента, перед которым ставились задачи получения регулярных синхронных данных о пространственной структуре поля скорости поверхностных течений на акватории Полигона. Данные измерений скорости течения, измеренной доплеровским КВ-радиолокатором, верифицировались на основе сопоставления с данными измерений, получаемых с помощью контактных методов: донных станций с акустическими доплеровскими профилографами скорости течения (ADCP), буксировок ADCP за судном, а также дрифтеров поверхностного слоя. Этот эксперимент был начат в 2015-2016 гг. и продолжался в 2017 г.

В 2017 были продолжены начатые в 2015-2016 гг. целенаправленные исследования процессов распространения в Черном море вод Азовского моря, поступающих в него

через Керченский пролив, и влияния этих вод на гидрофизические и гидрохимические параметры черноморской экосистемы. Степень и характер этого влияния изучены еще недостаточно и представляют большой научный интерес. Можно добавить, что сток вод из Керченского пролива, испытывающего большую антропогенную нагрузку, является одним из источников загрязнения морской среды Черного моря.

В целом в рамках экспедиционных исследований 2017 г., получены новые данные о гидродинамических, гидрологических, гидрохимических процессах, о состоянии и динамике биологических форм, об экологии прибрежной зоны Черного моря в его северовосточной части. Анализ данных позволил выявить ряд вопросов и проблем, требующих дополнительных исследований. В условиях глобальных климатических изменений и возрастающего антропогенного стресса необходимость дальнейшего проведения мониторинга состояния прибрежной черноморской экосистемы на основе регулярных экспедиционных исследований и измерений, выполняемых автономными станциями, становится все более актуальной.

Зацепин А.Г., Куклев С.Б.

## Список сокращений

ААС – атомно-абсорбционная спектрометрия

АЗВТ – автоматическое зондирование водной толщи

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ВКС – верхний квазиоднородный слой

ВНИРО – Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии

ВОВ - взвешенное органическое вещество

ВЭЖХ – высокоэффективная жидкостная хроматография

ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система

ГМС – гидрометеорологическая станция

ДК – допустимые концентрации

3В – загрязняющие вещества

ИАЗ ЮНЦ РАН – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук»

ИК – инфракрасный

ИМБИ – Институт морских биологический исследований им. А.О. Ковалевского

ИО РАН – Институт океанологии им. П.П.Ширшова Российской академии наук

ИСЗ – искусственный спутник Земли

КВ – коротковолновый (радар и др.)

КГНЦ – Крыловский государственный научный центр

МГИ – Морской гидрофизический институт

МНИС БМП – малое научно-исследовательское судно, бот моторный промысловый

ОВП – окислительно-восстановительный потенциал

ОРВ – окрашенное растворенное органическое вещество

ОЧТ – Основное черноморское течение

ПАУ – полиароматические углеводороды

ПДК – предельно допустимая концентрация

ПК – прочный корпус

ПХБ – полихлорированные бифенолы

РГГМУ – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

РОВ – растворенные органические вещества

СВЧ – сверхвысокочастотное излучение

СПАВ – синтетические поверхностные активные вещества (АПАВ – анионные)

ТЗ – техногенные загрязнения

ТПМ – температура поверхности моря

ХОП – хлорорганические пестициды

ХПС – холодный промежуточный слой

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ЮНЦ РАН – Южный научный центр Российской академии наук

ЮО ИО РАН – Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

ADCP – акустический доплеровский профилограф (acoustic Doppler current profiler)

AAS – атомно-абсорбционная спектрометрия (Atomic absorption spectroscopy)

CTD-зонд – зонд, измеряющий электропроводность, температуру и давление (conductivity, temperature, depth)

CTD-разрез – серия измерений электропроводности, температуры и давления (conductivity, temperature, depth)

Chl-а – хлорофилл «а» (Chlorophyll A)

GSM/GPRS – глобальныйстандартцифровоймобильнойсвязи(Global System for Mobile Communications/General Packet Radio Service)

GPS – глобальная система позиционирования (Global Positioning System)

MDS – метод непараметрического многомерного шкалирования (Multidimensional scaling)

NOAA – Национальное управление океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration)

ROV – подводный дистанционно-управляемый аппарат (remotely operated underwater vehicle)

# Введение

Регулярные комплексные научные экспедиции в шельфовой склоновой зоне Черного моря ИО РАН выполняет с 1999 г. С самого начала основные задачи экспедиции имели комплексный мультидисциплинарный характер и охватывали широкий круг фундаментальных и прикладных океанологических проблем. Экспедиция «Черное море - 2017» стала логическим продолжением предшествующих многолетних исследований, цели и задачи которой определялись результатами ранее выполненных работ.

В программу комплексной научной прибрежной экспедиции «Черное море – 2017» входили исследования по следующим направлениям.

## Физическое направление:

- поддержание гидрофизического полигона автономных станций (профилограф «Аквалог», донные ADCP, заякоренные термокосы) с целью получения квазинепрерывных рядов гидрофизических и метеорологических данных с высоким (субмезомасштабным) пространственно-временным разрешением;
- подготовка и проведение эксперимента с КВ-радиолокатором (радаром), размещаемом в избранной точке побережья (пирс ЮО ИО РАН) с целью измерения скорости поверхностного течения на акватории гидрофизического полигона и мористее его (до 20 км от берега);
- проведение «подрадарных» гидрофизических измерений (пространственная съемка поля скорости течения на акватории полигона с помощью буксируемого за судном ADCP, измерения профиля скорости течения в различных точках с помощью донных станций ADCP) с целью верификации данных радарных измерений и получения новых представлений о трехмерной пространственной структуре поля скорости течения на акватории полигона;
- отработка методик измерения и оперативной передачи данных, а также дальнейшая проверка надежности автономных измерительных станций, внедрение новых технологий (в том числе, оперативной передачи данных по оптоволоконному кабелю, проложенному по дну моря в 2016 г., и подключение к нему различных измерительных систем);
- идентификация Основного черноморского течения, мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей на основе анализа регулярно получаемых спутниковых изображений поверхности моря в ИК-диапазоне (радиационная температура) и в видимом диапазоне (цвет);
- использование буксируемого за судном ADCP и дрифтеров верхнего слоя с GPSопределением координат и оперативной передачей данных по каналам GSM/GPRS мобильной связи; долговременная регистрация течений и параметров стратификации в

шельфово-склоновой зоне моря с помощью автономных измерителей на заякоренных буйковых станциях (профилограф «Аквалог», донные станции ADCP, заякоренные термокосы и др);

- установка донных заякоренных станций с измерителями скорости течения у дна на основе использования инклинометров;
- лидарные измерения концентрации растворенных органических веществ, общей взвеси, хлорофилла в районах влияния материкового стока;
- использование проточной измерительной системы, обеспечивающей высокое разрешение данных о термохалинном состоянии поверхностного слоя, особенно в приустьевых районах;
- измерение метеопараметров в море с использованием автоматической метеостанции с системой оперативной передачи данных, установленной на заякоренном навигационном буе.

## Химическое направление:

- отбор проб из батометров для гидрохимических анализов на судовых станциях; изучение реакции гидрохимической структуры на гидрофизические процессы; подробный, с детальным разрешением по вертикали, отбор проб в зоне контакта аэробных и анаэробных вод; определение на судне и в береговых лабораториях концентраций широкого спектра гидрохимических параметров: содержания растворенного кислорода, фосфатов, силикатов, нитратов, нитритов, аммония, сероводорода (а также сульфатов и полувосстановленных форм серы), растворенного марганца и метана, общей щелочности, тяжелых металлов хлорорганических пестицидов и нефтеуглеводородов;
- мониторинг вышеперечисленных химических параметров на судовом разрезе, в Геленджикской и Голубой бухтах (учащенный порядок отбора проб в бухтах с целью выяснения изменчивости параметров на масштабе бухты);
- отбор проб воды и донных отложений для анализа на маркеры антропогенного загрязнения и стойкие хлорсодержащие загрязнители.

## Биологическое направление:

• отбор проб из батометров для анализа содержания хлорофилла и взвешенного вещества, состава и концентрации микро- и фитопланктона, а также сетные ловы мезо- и макрозоопланктона на станциях с опорой на гидрофизическую информацию; фоновые измерения характеристик планктонного сообщества в шельфовых районах и открытых водах; изучение особенностей распределения и функционирования доминирующих видов планктонных водорослей и микропланктона; изучение особенностей состава зоопланктона, вертикального распределения, питания, жизненных циклов и поведенческих реакций массовых видов; изучение вертикального распределения, размерной структуры, уровня развития и питания макрозоопланктона, включающего желетелый планктон как черноморских видов (медуза Aureliaaurita), так и вселенцев (гребневики Мпетiopsisleidyi и Beroeovata), ихтиопланктон (икра и личинки рыб), мониторинг

прибрежных донных сообществ, мониторинг и изучение состава видов-вселенцев прибрежных пелагических и донных сообществ;

• исследования современного состояния донных зооценозов, в том числе в слое черноморского редокс-хемоклина.

## Техническое направление:

- продолжение испытаний нового сканирующего водную толщу зонда с управляемой плавучестью, а также подводной автоматической лебедки;
- испытание измерителей скорости придонного течения, разработанных в ЮО ИО РАН на основе использования инклинометров;
- проверка работы и модернизация технического оборудования буя с морской метеостанцией, оснащенной системой оперативной передачи данных на береговой сервер.

Кроме морских работ в экспедиции был выполнен ряд научных исследований и экспериментов на берегу, в лабораториях ЮО ИО РАН. К ним относятся обработка химических и биологических проб и сетных ловов; прием, обработка и анализ спутниковой информации о температуре поверхности моря, содержании взвеси и хлорофилла «а», а также некоторые другие работы.

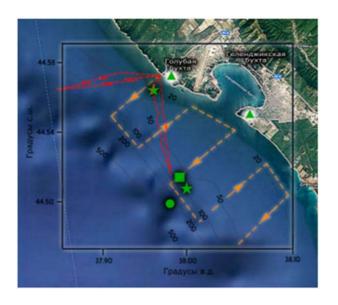
Значительная часть вышеперечисленных исследований проводилась на акватории черноморского полигона ИО РАН «Геленджик», схематично изображенного на рисунке В.1.

Полигон организован в акватории шельфовой склоновой зоны северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджика. Он простирается вдоль берега от района Голубой бухты до п. Дивноморского (15 км) и в поперечном берегу направлении – от изобаты 20 м до изобаты 300 м (8 км). Основной задачей Полигона является круглогодичный мониторинг состояния водной среды и биоты. Размещенные на Полигоне автономные измерительные системы в составе донных станций с акустическими доплеровскими профилографами скорости течения, автоматических зондов-профилографов «Аквалог» и термокос на заякоренных буйковых станциях обеспечивают регулярное получение гидрофизических, гидрохимических и биооптических данных с высоким пространственно-временным разрешением и, в ряде случаев, их оперативную передачу в береговой центр.

Морские экспедиционные работы обеспечивались малым судном МНИС БМП-74 «Ашамба» (рис. В.2).

Широкий круг исследовательских задач решается с помощью технического оснащения судна, которое включает:

- бортовое электропитание 220В, 380В, 12 В;
- бензиновый генератор 2 кВт, 220 B;
- двухбарабанная лебедка с турачкой грузоподъемностью до 250 кг;
- кормовая П-рама для работы с CTD-зондами, а также используемая для постановки и снятия донных и заякоренных станций,



## РИС. В.1.

Схема черноморского полигона ИО РАН «Геленджик». Зеленые треугольники – береговые метеостанции. Зеленые звездочки – станции в составе донного ADCP и заякоренной термокосы. Зеленый круг – зонд-профилограф «Аквалог» на заякоренной буйковой станции. Зеленый квадрат – навигационный заякоренный буй с автоматической метеостанцией и системой оперативной передачи данных. Пунктирная линия со стрелками – галсы судна при проведении измерений скорости течения буксируемым за судном ADCP. Красные «молнии» – доплеровский КВ радар SeaSonde для измерения поверхностных течений на акватории полигона



## РИС. В.2.

- отводная стрела 5 м по левому борту для работы с планктонными сетями;
- две сквозные шахты для установки приборов и выполнения измерений на ходу судна;
- эхолот;
- GPS-навигатор.

Как маломерное судно МНИС «Ашамба» имеет ряд ограничений: по району плавания (12-мильная прибрежная зона); по автономности мореплавания; по штормовым условиям. Поэтому экспедиционные работы выполнялись в основном в шельфово-склоновой зоне моря в виде однодневных выходов при благоприятных погодных условиях. Для выполнения работ в местах, удаленных от места базирования судна (полуостров Крым, Керченский пролив, районы г. Анапы, г. Туапсе и др.), судно покидает место базирования на сутки и более. В годичном цикле экспедиционная работа была организована в виде отдельных, иногда взаимосвязанных этапов, и выполнялась путем организации последовательных выходов судна с частичной или полной заменой научного состава после каждого выхода (однодневного рейса). В общей сложности по Программе комплексной научной экспедиции «Черное море – 2017» на МНИС «Ашамба» было выполнено 90 однодневных выходов (рейсов). Начало морских экспедиционных работ – март 2017 г., а окончание – декабрь 2017 г.

В экспедиционных работах приняло участие более 60 сотрудников Института океанологии и его Южного отделения и более 15 специалистов и студентов из других научных и учебных организаций. Результаты исследований представлены в виде отдельных глав, написанных руководителями работ по соответствующим этапам экспедиции и участниками этих этапов.

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

Зацепин А.Г.<sup>1</sup>, Куклев С.Б.<sup>1</sup>, Мысленков С.А.<sup>1 2 3</sup>, Очередник В.В.<sup>1</sup>, Подымов О.И.<sup>1</sup>, Сильвестрова К.П.<sup>1</sup>

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

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

 $<sup>^{2}</sup>$  Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

 $<sup>^{3}</sup>$  Гидромете<br/>орологический 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 субмезомасштабых 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,  $\omega$  – 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 KB-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 KB-радара SeaSonde и других радиолокационных систем для исследования субмезомасштабной динамики вод шельфа продолжаются.

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

- 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 дрифтеров 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:

- і) 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 СТD-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 Тегга 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 сенсора TM 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. і.і).

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/c) прибор производит только в режиме «bottom tracking», т.е. когда он принимает сигнал, отраженный от дна моря. Этот режим работы реализовывается, 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, АДСР 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 и – 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 і.і.

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	o °C - +35 °C
Точность измерения температуры	0.01 °C
Чувствительность канала измерения температуры	0.001°C
Точность измерения давления	0.1 %
Временной тренд датчика давления	0.15% за 12 мес.
Разрешение по глубине	0.9-2 м
Постоянная времени датчиков:	
температуры	5 c
давления	0.05 c
Возможный и используемый период опроса датчиков	(2-3600) c; (10-30) c
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. В1). Комплекс представляет собой носитель с расположенной на нем измерительной аппаратурой

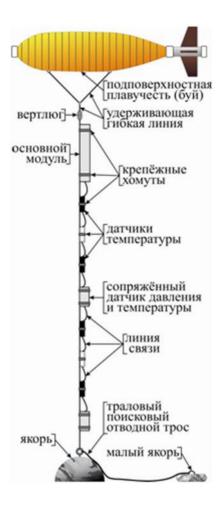
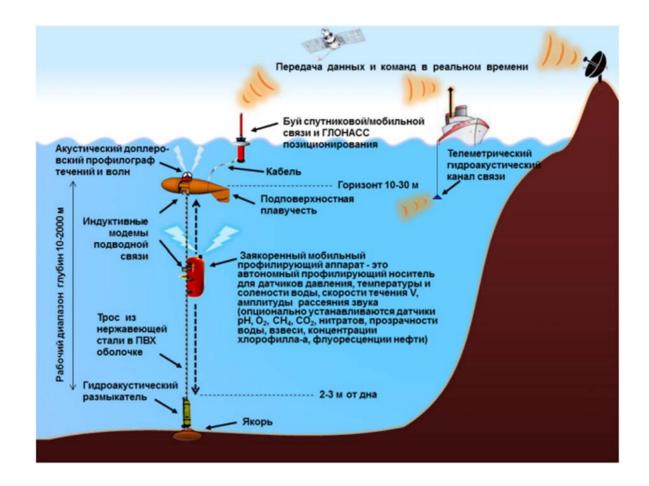


РИС. 1.2.

Схема измерительного комплекса «термокоса» на заякоренной буйковой станции

(СТD-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 І-2 м по вертикали следующих параметров: температура, соленость, плотность вод, вертикальная и горизонтальные составляющие скорости течения, мощность сигнала обратного акустического рассеивания, опционально - флюоресценция 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 – дрифтеры (Сильвестрова и др., 2015, 2016). Для исследования течений в прибрежной зоне моря были изготовлены малые серии дешевых дрифтеров. Схема дрифтера представлена на рисунке 1.5. Дрифтер 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 і 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 дрифтера по мобильной связи может осуществляться с различной периодичностью: от 10 минут до нескольких часов. Режим с редкой передачей дан-



## РИС. 1.4.

Расположение доплеровского KB-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) дрифтера

ных осуществляется для экономии батарейного питания. В экономном режиме батарей может хватить на несколько недель работы дрифтера. Однако в большинстве случаев дрифтеры находятся в море 1-2 суток, после чего их поднимают на борт судна или катера. При возрастании времени пребывания дрифтера 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 квазиоднородного 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-

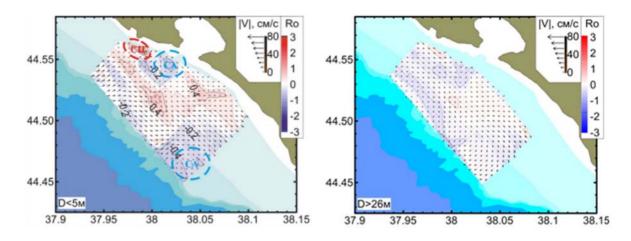


РИС. 1.6.

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 – субмезомасштабный циклон (СЦ), синие линии – субмезомасштабный антициклон (СА)

твердили гипотезу, что субмезомасштабные 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 субмезомасштабного 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 субмезомасштабное вихревое образование.

В отличие от съемки о5 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 оз 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 субмезомасштабные вихри, еще раз подтверждает многолетнюю статистику проведения эксперимента: они обнаруживаются приблизительно в 70 процентах выполняемых съемок.

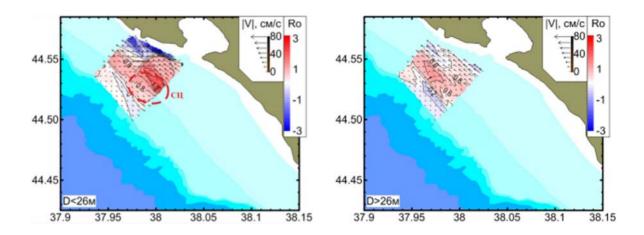


РИС. 1.7.

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

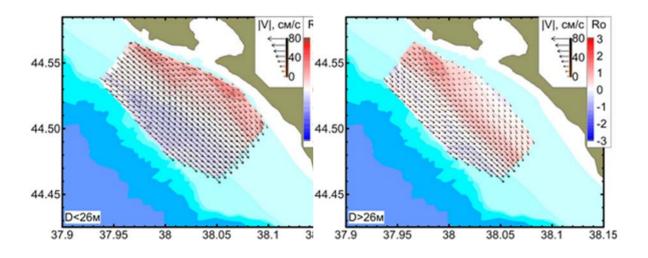
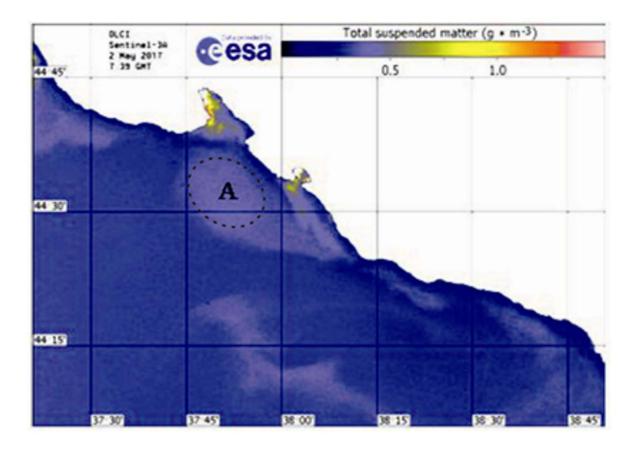


РИС. 1.8.

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.

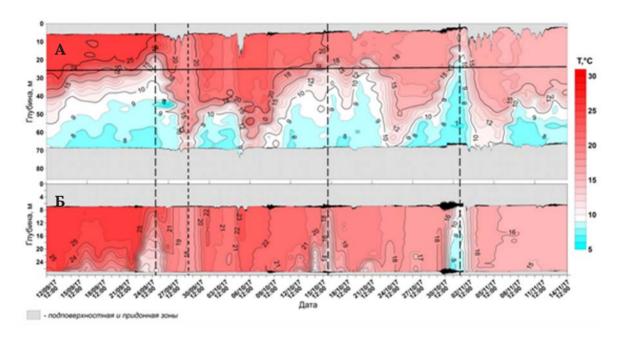
Спутниковое изображение мезомасштабного антициклонического вихря (он имеет более светлый тон и обозначен буквой «А») в поле взвешенного вещества в акватории между Новороссийском и Геленджиком. Данные OLCI Sentinel - 3A, 07:39 GMT, 02 мая 2017 г.

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°30.022'с.ш. и 037°59.264'в.д. Регистрация вертикального распределе-



## РИС. 1.10.

Вертикальное распределение температуры воды в период с 12 сентября по 14 ноября 2017 г.: A – «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 °34.1440' с.ш., 037 °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».

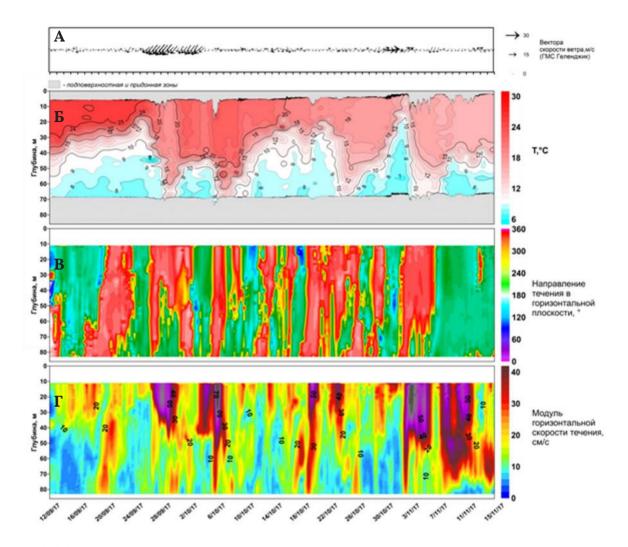
Сопоставляя между собой результаты измерений, представленных на рис. 1.10 а и б, можно отметить, что изменения температуры на обеих «термокосах» происходят квазисинхронно. Понижения или повышения температуры в водной толще на внешнем и внутреннем шельфе продолжительностью в несколько суток и более являются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

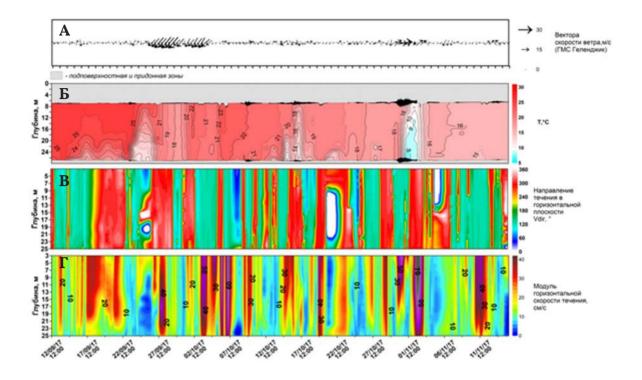


## РИС. 1.11.

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 – СТD-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 °C (рис. 1.15). Высокочастотные измерения позволили детально рассмотреть динамику этого процесса. Первое кратковременное появление слоя воды с температурой менее 8°C, 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

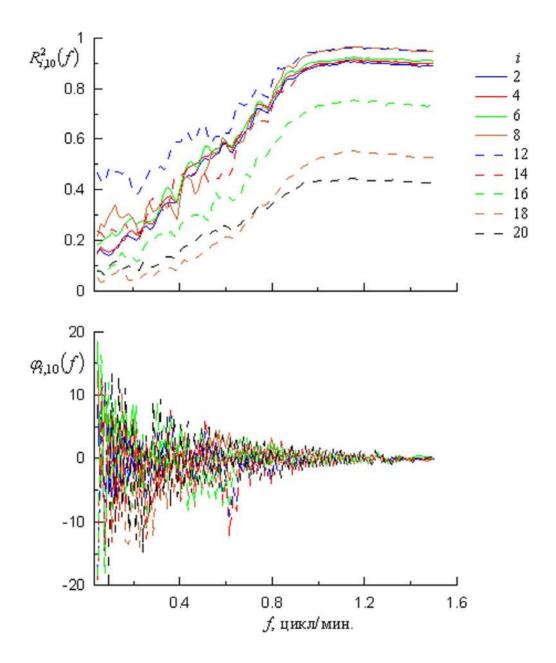
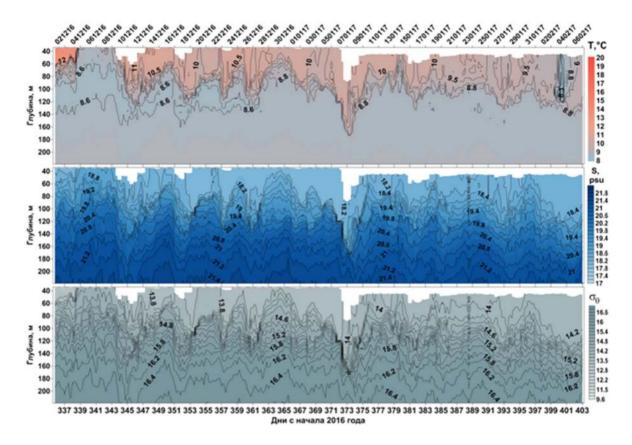


Рис. 1.13.

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

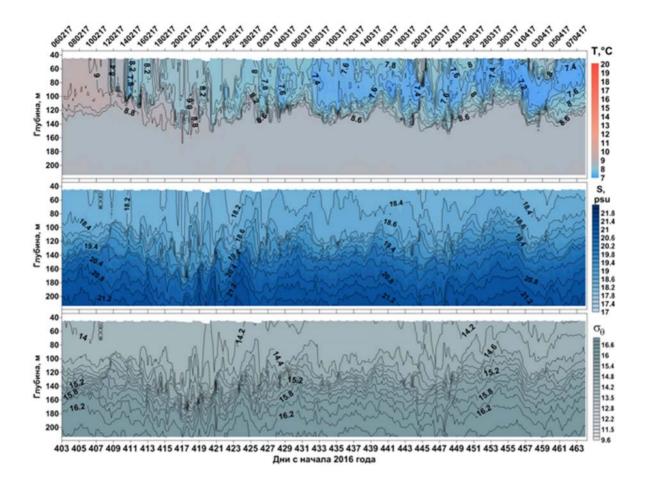


## РИС. 1.14.

Временная изменчивость температуры воды (верхний график), солености (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 °С 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 7.3-7.6 °C (рис. 1.16).

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

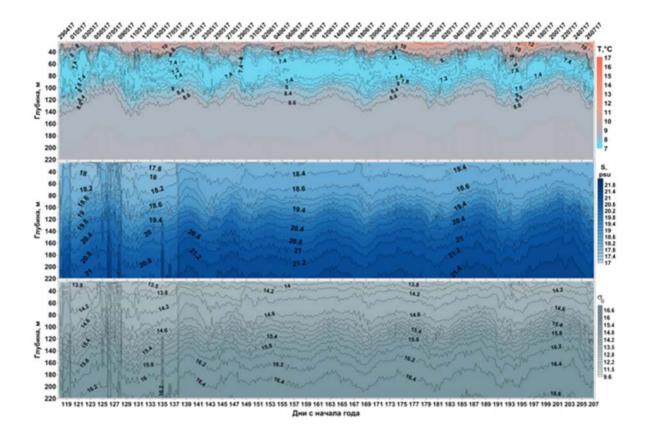


# РИС. 1.15.

Временная изменчивость температуры воды (верхний график), солености (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 заглублением.

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 илистых

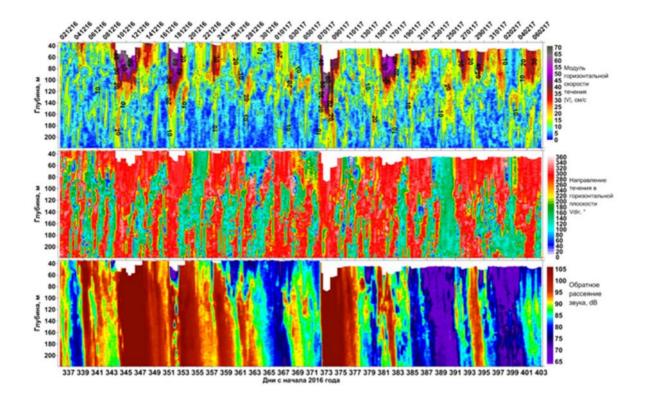


#### РИС. 1.16.

Временная изменчивость температуры воды (верхний график), солености (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 теплый 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.

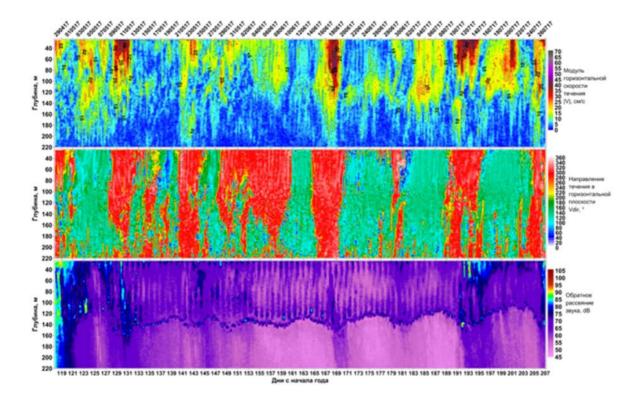
В весенне-летний период наблюдалось ослабление гидродинамических процессов. Следствием этого стало общее снижение концентрации взвеси в воде и уменьшение турбулентности. На этом фоне проявились процессы, которые не наблюдаются в хо-



#### 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 дрифтерных экспериментов

Дрифтерный эксперимент на гидрофизическом полигоне проводился в период с 25 по 27 июня 2017 г. Было произведено несколько запусков дрифтеров с различным заглублением 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 дрифтеры 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 дрифтеры, отклоняясь в сторону берега, зашли в Голубую бухту. Следующие 4 запуска были сделаны северо-западнее Голубой бухты. По смещению дрифтеров было определено вдольбереговое течение северозападного 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. Сликовых полос не обнаружено, были большие овальные скопления мусора.

Более детальный анализ результатов дрифтерных 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: дрифтеры часто сбивались парами, то есть от первоначального положения между дрифтерами 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 дрифтеров с заглублением паруса 0-0.5 м и для дрифтеров 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 дрифтеров приблизительно соответствует положению ADCP. Таким образом, измерения скорости течений по данным ADCP и дрифтеров практически полностью совпадают.

В эксперименте 26 июня во время первого запуска на траверзе Голубой бухты все дрифтеры, 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.

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



Рис. 1.19.

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

блением паруса 0-0.5 м двигался со скоростью 40 см/с направлением 320°. Дрифтеры 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 дрифтеров совпадает с данными ADCP, однако в самом поверхностном слое по данным дрифтеров 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 вешних факторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 1

- *I.* 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.  $\mathbb{N}^{o}$  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.  $N^{\circ}$  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.  $\mathbb{N}^{0}$  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). C. 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 дрифтеров // 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 аппаратнопрограммный 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. T. 12. № 3. C. 171-184.
- 19. Сильвестрова К.П., Мысленков С.А., Зацепин А.Г. и др. Возможности использования GPS-дрифтеров для исследования течений на шельфе Черного моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 159-166.
- Сильвестрова К.П., Зацепин А.Г., Мысленков С.А. Прибрежные апвеллинги в гелен-20. джикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 521-530.
- Ostrovskii A., Zatsepin A. Short-term hydrophysical and biological variability over the 21. northeastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys // Ocean Dynamics. 2011. T. 61. № 6. P. 797-806.

Арашкевич Е.Г.<sup>1</sup>, Луппова Н.Е.<sup>1</sup>, Подымов О.И.<sup>1</sup>, Часовников В.К.<sup>1</sup>

# ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЭТАПА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной целью данного этапа было исследование пространственно-временной изменчивости структуры и функционирования пелагической экосистемы, а также факторов, определяющих эти изменения; изучение степени взаимодействия/изоляции шельфовых и глубоководных пелагических экосистем; оценка влияния локальных климатических условий на состав, обилие и жизненные циклы ключевых компонентов биоты.

Исследование пелагической экосистемы включало в себя три основных блока:

- гидрофизический блок анализ распределения температуры, солености, условной плотности, флюоресценции и мутности;
- гидрохимический блок определение концентрации растворенного кислорода, сероводорода, общей щелочности, фосфатов, валового фосфора, силикатов, нитритов, нитратов, аммония, валового азота и рН;
- биологический блок анализ содержания хлорофилла-а (Chl-a) в воде, определение состава, численности и биомассы мезозоопланктона и желетелого макрозоопланктона.

Судовой мониторинг выполнялся на стандартном 9-мильном разрезе от берега до глубины 1500 м на траверзе Голубой бухты (рис. 2.1). На каждой станции разреза проводились гидрофизические исследования, отбирались гидрохимические и

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Е-mail: alena@ocean.ru

биологические пробы. Цифрами на схеме обозначены глубины станций: 10 м (бухта), 25 м (внутренний шельф), 50 м (срединный шельф), 100 м (внешний шельф), 500 м и глубже (континентальный склон).

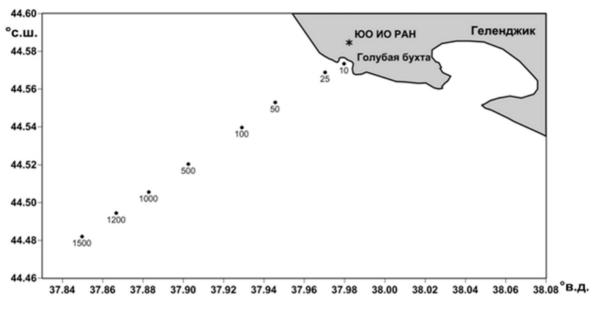


РИС. 2.1.

Схема расположения станций на 9-мильном мониторинговом разрезе (цифрами указаны глубины станций)

# МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

За период с 13 апреля по 22 декабря 2017 г. с использованием МНИС «Ашамба» было выполнено 14 судовых экспедиционных выходов.

Гидрофизические исследования выполнялись СТD-зондом SBE 19 plus, установленным на гидрофизический комплекс «Розетта» (SBE 55), оснащенный шестью батометрами Нискина для отбора гидрохимических проб и работающий в режиме онлайн-регистрации данных измерений через бортовой блок SBE 33. Для измерения флуоресценции Chl-а и мутности морской воды использовался флюориметр WET Labs ECOFL, подключенный напрямую к СТD-зонду. На станциях с глубинами 10-100 м зондирование производилось до дна, на станциях с глубинами 500-1500 м - до глубины 300 м.

Отбор гидрохимических проб в море проводился пластиковыми батометрами Нискина и осуществлялся непосредственно после их подъема на палубу в соответствии с принятыми методиками. Пробы отбирались через тайгоновые прозрачные шланги, позволявшие контролировать отсутствие пузырька воздуха при заполнении склянок. Сразу после отбора проводилась фиксация проб на растворенный кислород, сероводород и аммонийный азот. На определение биогенных элементов (силикаты, фосфаты, формы азота, валовый азот, фосфор и др.) воду отбирали в пластиковую посуду (объемом 500 мл) без консервации.

Анализ проб выполнялся на берегу в лаборатории химии ЮО ИО РАН.

Растворенный кислород определялся по модифицированному методу Винклера с использованием полуавтоматической титровальной установки «Digitrate 810» (США).

Величина рН определялась потенциометрическим методом с помощью ионометров И-500 (Россия) и WDW-330 і (Германия).

Щелочность определялась методом прямого титрования в береговой лаборатории. Фосфаты определялись фотометрически по методу Морфи-Райли.

Силикаты определялись фотометрически при концентрациях ниже 60 мкМ в пробе по методу Королева с образованием голубого молибденового комплекса, при более высоких концентрациях - по желтому комплексу.

Валовый/органический фосфор определялся сожжением до фосфатов на водяной бане с персульфатом калия.

Аммонийный азот определялся по методу Сэджи-Солорзано с образованием фенолгипохлоритного комплекса.

Нитритный азот (нитриты) определялся колориметрически. Предел чувствительности определения элемента составлял 0.0005 мг/л.

Нитратный азот (нитраты) определялся колориметрически после его восстановления на кадмиевых колонках до нитритного азота. Предел чувствительности определения элемента составлял 0.005 мг/л.

Валовый/органический азот определялся по методу Вальдеррама сжиганием в автоклаве при температуре 105 °C в течение 40 минут с разложением до нитратов.

Сероводород определялся фотометрически при небольших концентрациях с диметил-пара-финелендиамином, а при больших концентрациях – иодометрическим титрованием с использованием титраторов Metrohm (Германия) и АТП-02 (Россия).

Общий фосфор измерен методом мокрого сожжения с персульфатом калия по РД 52.10.243-92.

Фотометрические измерения проводились на фотоколориметрах КФК 3 (Россия) и Hach (Германия). Для приготовления реактивов использовался деионизатор Simplicity 185 D-301.

Биологические пробы для измерения концентрации фитопигментов (Chl-а и феофитина) были собраны батометрами Нискина комплекса Rosett Sea Bird 911 plus на глубинах 0, 10, 20 50 и 70 м, а также в слое максимума флюоресценции, определенного предварительным зондированием СТД-зондом, оснащенным датчиком флюоресценции. Для измерения концентрации Chl-а воду фильтровали через фильтры GF/F. Экстракцию проводили 90%-м ацетоном при температуре +4 °C в темноте в течение 24 ч. Флуоресценция экстрактов была измерена на флюориметре Trilogy Turner Designs (США). Концентрацию Chl-а и феопигментов рассчитывали по формуле для in vitro флюориметрии (Strickland, Parsons, 1968).

Сбор проб зоопланктона проводили сетными вертикальными ловами от дна до поверхности на шельфовых станциях и от границы сероводородного слоя (условная плотность 16.2) до поверхности на глубоководных станциях. Мезозоопланктон собирали сетью Джеди (площадь входного отверстия о.1 м², размер ячеи 180 мкм). Пробы фиксировали 4%-м раствором формалина, нейтрализованного бурой. Для определения индивидуального веса животных в единицах углерода использовали формулы, приведенные в (Arashkevich et al., 2014). Разбор и анализ зоопланктонных проб проводился под бинокулярными стереомикроскопами Leica S6E и Leica MZ4 (Германия) по стандартной методике.

Макрозоопланктон собирали конической сетью с площадью входного отверстия 0.5 м<sup>2</sup> и размером ячеи 500 мкм. Немедленно после отбора пробу переливали в просторный сосуд с морской водой. Желетелый макрозоопланктон (гребневиков и медуз) подсчитывали и измеряли в «живой» пробе. Животных поочередно переносили в прозрачный сосуд и измеряли их размер линейкой, приложенной ко дну сосуда: у гребневиков длину тела измеряли от аборального органа до рта; у медуз измеряли диаметр купола. Вес тела в единицах углерода определяли по формулам зависимости содержания углерода от длины тела, полученным для гребневиков Mnemiopsis leidyi и Beroe ovata (Finenko et al., 2003) и медуз Aurelia aurita (Anninsky, 2009) Черного моря.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

# Пространственно-временная изменчивость гидрофизических параметров в 2017 г.

Относительно холодная зима 2016-2017 гг. и последующая холодная весна привели к тому, что стабильный прогрев верхнего слоя начался только в конце апреля. Первая судовая экспедиция, отметившая сформировавшийся верхний квазиоднородный слой, состоялась 16 мая, толщина ВКС на срединной станции разреза с глубиной 500 м на этот момент была 10 м. Дальнейшая динамика ВКС в целом была типична для наблюдаемого района (рис. 2.2): некоторое уменьшение ВКС параллельно с ростом его температуры и начиная с июля увеличение толщины и температуры, вплоть до конца августа. Потом последовало осеннее остывание: ВКС продолжил увеличиваться в толщине, при этом температура слоя постепенно уменьшалась. Мощные норд-осты в конце сентября – начале октября (рис. 2.3) на протяжении недели основательно перемешали верхний слой, увеличив глубину ВКС до 50 м. Тем не менее, спустя всего несколько дней стратификация частично восстановилась, и глубина перемешанного слоя уменьшилась до 28 м с небольшим ростом его температуры.

Максимум температуры воды на мониторинговом разрезе был зафиксирован 15 августа и составил 27.9 °C, причем это была не только поверхностная температура – прогрев всего ВКС на тот момент превышал 27 °C.

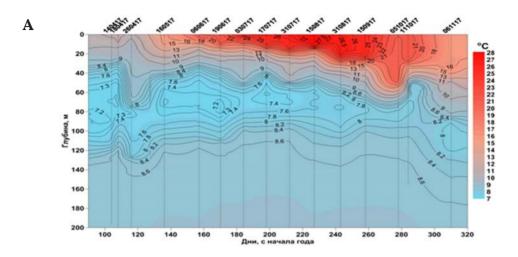
2017 год был первым, начиная с 2013, когда мы наблюдали сформировавшийся холодный промежуточный слой. В 2013 г. ХПС представлял собой остаточное явление после аномально холодной зимы 2011-2012 гг., а в 2014-2016 гг. ХПС не наблюдался вовсе. В 2017 г., во время первого мониторингового рейса, толщина этого слоя составила 83 метра, а температура в ядре ХПС опускалась менее 7.2 °C. В дальнейшем толщина слоя скачкообразно снижалась, а его температура постепенно росла. Но, тем не менее, ХПС продолжал наблюдаться во время всех мониторинговых выходов, в том числе поздней осенью.

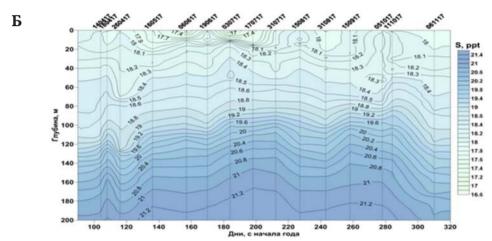
Толщина термоклина в 2017 г. была несколько меньше, чем в предыдущие годы, что вполне объяснимо появлением ХПС, «подпирающим» теплый слой снизу. 31 июля был отмечен его локальный максимум (толщина 28 м), и дальнейшая изменчивость была скачкообразной (зависела от динамики течений и ветрового воздействия) вплоть до последнего судового выхода 6 ноября, когда толщина термоклина составила 29 м. Последний факт, видимо, связан с теплой осенью, замедленным процессом остывания верхнего слоя и достаточно интенсивным вертикальным турбулентным обменом, обусловленным заметно усилившимся в конце сентября ветровым воздействием.

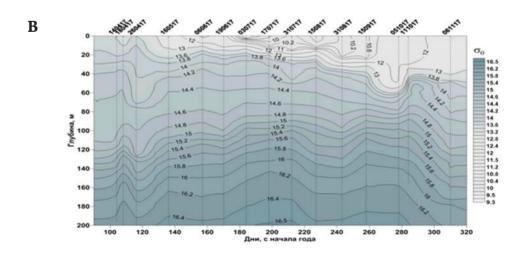
Сезонная изменчивость солености в ВКС 2017 г. в целом была довольно типичной. По мере прогрева верхнего слоя (и затруднения перемешивания), речной сток и осадки постепенно опресняли верхний слой, и поверхностная соленость постепенно снижалась от 18.1 psu 14 апреля до 16.7 psu к 3 июля (рис. 2.2б). На ближайших к берегу точках (в пределах одной морской мили) соленость в этот день опускалась еще ниже, вплоть до 16.5 psu. Как уже отмечалось ранее (Подымов, Зацепин, 2016), данное опреснение не связано напрямую с локальными осадками, фиксируемыми местной метеостанцией. Вероятней всего, оно является результатом вдольбереговой адвекции более пресной воды из других районов (Сочи-Сухуми), где в период паводка (апрель-май) имеет место обильный речной сток.

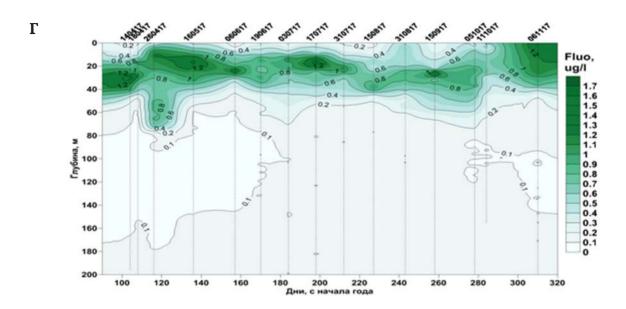
Усиливающийся солнечный прогрев и сопутствующее ему увеличение испарения, а также турбулентное вовлечение в ВКС более соленой воды снизу приводят к росту солености в ВКС, начавшемуся со второй половины июля. В целом из-за жаркого лета и теплой осени соленость в верхнем слое была выше, чем в предыдущие годы, и начиная с августа она уже не опускалась ниже 17.9 psu, достигнув максимума 5 октября (18.2 psu).

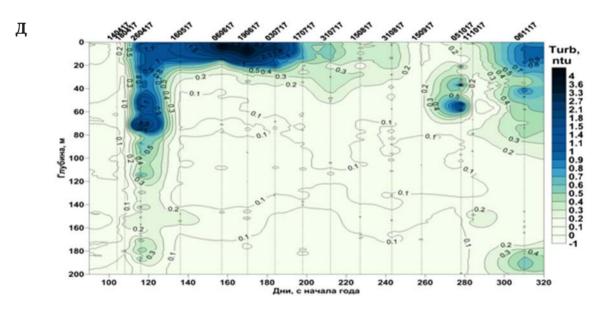
Изменчивость плотности воды в верхнем слое практически повторяет годовой ход температуры (рис. 2.2в), поскольку температурный вклад в плотность воды в ВКС является основным и значительно превышает вклад солености. Минимальная условная





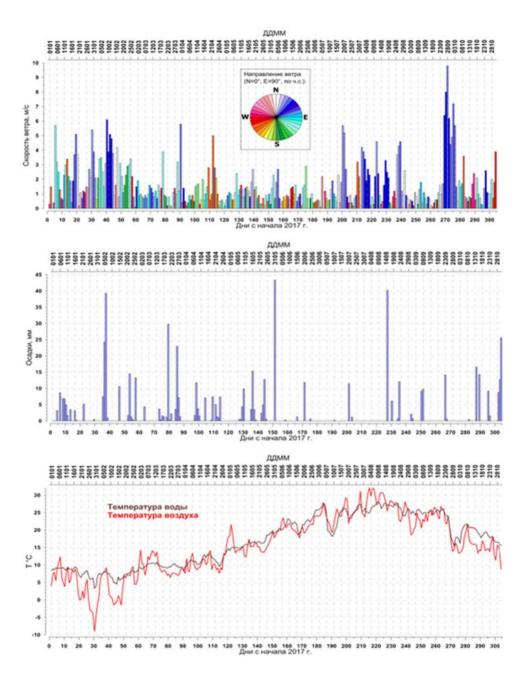






## РИС. 2.2.

Годовой ход температуры (а), солености (б), условной плотности (в), флюоресценции (г) и мутности (д) на срединной точке мониторингового 9-мильного разреза (станция над изобатой 500 м)



# РИС. 2.3.

Среднесуточные направление и скорость ветра (верхний график), суточные осадки (средний график) и температура воздуха и поверхностной воды (нижний график) по данным метеостанции г. Геленджика в период с января по октябрь 2017 г.

плотность (о.<10.6) в верхнем слое наблюдалась в периоды максимального прогрева воды, с начала июля по середину сентября, когда температура ВКС была выше 25 °C. Абсолютный минимум условной плотности (σ,< 9.3) был отмечен 3 июля в верхних двух метрах и был вызван мощным дневным прогревом и слабым перемешиванием.

Положение сероводородной границы (изопикна 16.15) немного понизилось по сравнению с предыдущим годом (162 м в среднем по сравнению со 158 м в 2016 г.). Соответственно увеличилась и толщина кислородсодержащего слоя (от поверхности до изопикны 15.85): со 134 м в среднем в 2016 г. до 140 м в среднем в 2017 г. Связано это с более сильным зимним перемешиванием, уменьшающим температуру в ХПС и повышающим его плотность.

Данные по флюоресценции Chl-а в 2017 г. показали следующую динамику. Всего за год наблюдалось несколько вспышек цветения фитопланктона с концентрациями более 1.2 мкг/л: в середине апреля и середине мая, в середине июля, середине сентября и начале ноября (рис. 2.2г). Апрельское цветение располагалось под термоклином и над ХПС, в диапазоне 25-40 м, майское и июльское – в термоклине (12-23 м), сентябрьское – тоже в термоклине, но глубже (24-30 м), и ноябрьское – в верхней части ВКС (от поверхности до 12 м). По мере охлаждения и увеличения толщины ВКС осенью, максимум концентраций флюоресценции вместе с термоклином смещался вниз. В целом цветение было обильнее, чем в предыдущем году, что связано с наличием ярко выраженного ХПС и, как следствие, большим притоком биогенов из этого слоя в эвфотический слой. Обычно к началу октября цветение фитопланктона снижается, сохраняясь только в ВКС, но благодаря теплой осени ноябрьские концентрации Chl-а в верхнем слое были ненамного меньше весенних и летних значений, превышая 1.2 мкг/л в верхних 33 м на станции с глубиной 1000 м. На станции с глубиной 500 м из-за повышенной мутности концентрации Chl-а более 1.2 мкг/л в начале ноября были сосредоточены в верхних 12 м. Максимум концентраций Chl-а был зафиксирован 17 июля на глубине 16 м и составил 1.74 мкг/л.

2017 г. был отмечен феноменально высокой концентрацией мутности. Отмеченный первый раз 26 апреля, слой мутности с концентрациями > 0.8 ntu был от поверхности до почти 80 м глубины, цепляя даже ХПС. Во время последующих рейсов слой мутности был локализован в ВКС и частично термоклине, оставаясь в пределах верхних 25 м (рис. 2.2д). Концентрации мутности были в целом несколько выше на ближних к берегу станциях, но тем не менее оставались очень большими на всем мониторинговом разрезе. Этот феномен наблюдался вплоть до конца июля, и только в августе вода начала постепенно очищаться. 5 октября локальные максимумы мутности были зафиксированы на глубине 35 и 50-60 м (соответственно нижняя часть ВКС и термоклин на тот момент), и 6 ноября слои повышенной мутности располагались в верхней части ВКС и термоклине. За все годы мониторинга мы впервые отмечаем столь высокие концентрации этого параметра. Слабый локальный береговой сток едва ли смог бы обеспечить подобные величины, не говоря уже о длительности и масштабах наблюдаемого феномена. Скорее всего, источник повышенной мутности располагался юго-восточнее (Сочинский район и южнее), откуда распространялся посредством ОЧТ. Возможным объяснением феномена может быть адвекция замутненных вод ОЧТ с более южных районов в период таяния накопившегося за период холодной зимы снежного покрова на участках высокогорья. Максимальные концентрации мутности были отмечены 6 и 19 июня: соответственно 4.5 ntu на самой дальней точке разреза с глубиной 1500 м на горизонте 3 м и 4.98 ntu на точке разреза с глубиной 50 м на горизонте 6 м.

## Годовой ход изменения гидрохимических параметров

На рисунке 2.4 представлены графики временного изменения содержания биогенных элементов в верхнем 60-метровом слое моря на станции, расположенной над изобатой 500 метров на 9-мильном разрезе (вверху даты выходов в море).

Анализ графиков годового хода гидрохимических параметров по данным судового мониторинга показывает, что в теплый период 2017 года минимальное содержание биогенных элементов в деятельном слое моря приходится на первую половину осени. Сильные и продолжительные норд-осты, имевшие место в конце сентября – начале октября, углубили ВКС за счет турбулентного вовлечения до 50 м как по температуре, так и по химическим показателям.

Таким образом, интенсивное ветровое перемешивание, связанное с длительным норд-остом, способствовало формированию в вертикальной гидрохимической структуре обширного слоя вод, обедненного биогенными элементами. По-видимому, это было связано с увеличением интенсивности фотосинтетической деятельности фитопланктона (содержание Chl-а увеличилось в 2 раза после шторма в верхнем 20-метровом слое), что является достаточно типичной его реакцией на штормовое воздействие. Что касается уменьшения абсолютного и процентного содержания кислорода в деятельном слое в этот период (рис. 2.5), оно отчасти связано с повышением температуры столба воды за счет вертикального перемешивания и проникновения теплой воды сверху вниз.

В целом естественный ход сезонной изменчивости биогенных элементов заключается в уменьшении концентраций форм азота, фосфора и кремния с началом вегетативного периода фитопланктона и их накопление в воде в зимнее время года. Средние значения для деятельного слоя по сезонам и за весь год представлены на рисунке 2.6.

В целом следует отметить, что увеличение или уменьшение фонового содержания биогенных элементов в различные годы в деятельном слое моря связано с множеством различных факторов.

В таблице 2.1 представлены средние за год значения химических параметров, рассчитанные для верхнего 50-метрового слоя воды по данным, полученным на мониторинговом разрезе за экспедиционный период 2014 - 2017 гг.

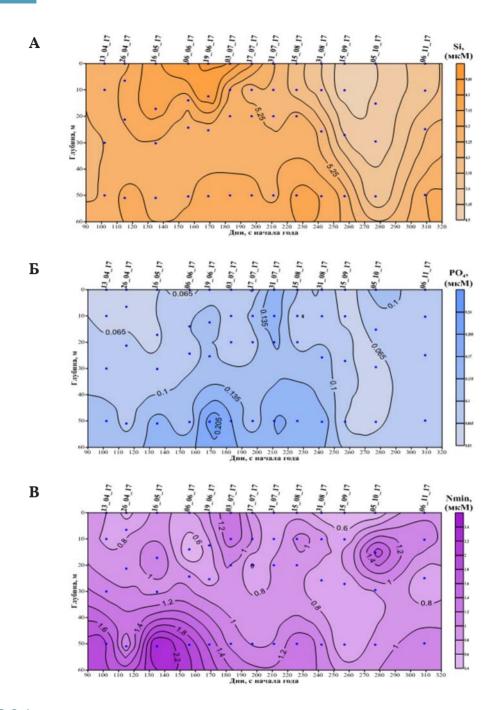


РИС. 2.4.

Годовой ход содержания кремния (а), фосфатов (б) и минерального азота  $(N_{min} = NO_3 + NO_2 + NH_4)$  (в) на станции 500 м в 2017 г.

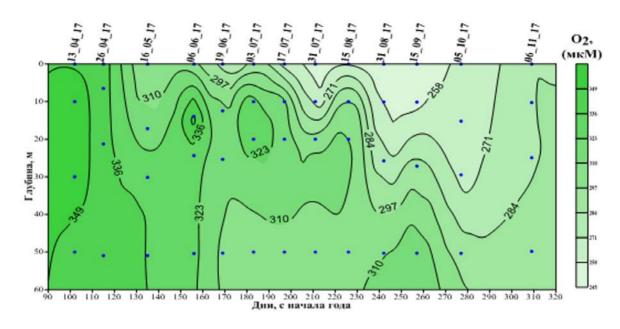


РИС. 2.5.

Годовой ход содержания растворенного кислорода на станции 500 м в 2017 г.

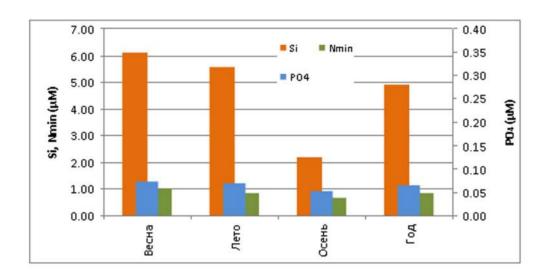


РИС. 2.6.

Сезонная изменчивость концентраций основных биогенных элементов в 2017 г.

Таблица 2.1. Среднегодовые значения концентрации биогенных элементов в верхнем 50-метровом слое воды на мониторинговом разрезе в 2014-2017 гг.

Параметр	Среднее значение за год			
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
Растворенный кислород $(O_{_2})$ , $\mu M$	275.9	331.4	276.4	294.7
$\Phi$ осфаты ( $PO_{_4}$ ), $\mu M$	0.06	0.05	0.07	0.07
Фосфор общий, μΜ	0.33	0.25	0.26	0.32
Кремний (Si), µМ	2.20	1.97	3.18	4.90
Нитраты ( $NO_{_3}$ ), $\mu M$	0.77	0.68	0.60	0.36
Нитриты ( $NO_{_2}$ ), $\mu M$	0.06	0.05	0.09	0.07
Аммоний (NH $_{_4}$ ), $\mu$ М	0.65	0.67	1.06	0.46
Азот минеральный (N <sub>мин</sub> ), µМ	1.47	1.45	1.82	0.85

Полученные результаты показывают, что в деятельном слое моря в 2017 г. наблюдалась тенденция уменьшения запаса минерального азота в 1.7 раза по сравнению с прошлыми годами. Это касается как в целом  $N_{_{\text{мин}}}$ , так и его всех отдельных форм ( $NO_{_{2}}$ ,  $NO_{_{2}}$ , NH ). Наиболее ярко выраженное уменьшение концентраций относится к среднегодовым величинам аммония (в 2.3 раза) и нитратов (в 1.7 раза).

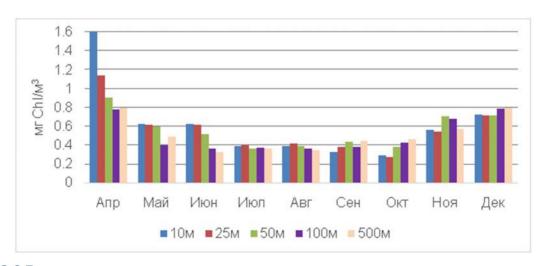
Следует отметить тренд повышения среднегодового содержания кремния, отмечаемого нами второй год подряд (с 2016 г.), который сменил тенденцию уменьшения концентраций кремнекислоты в прибрежно-шельфовой зоне моря в течение трех лет (с 2013 по 2015 г.). В отличие от 2015 года, кремний перестал выступать в роли фактора, лимитирующего процессы развития биологических сообществ. Содержание фосфора в минеральном и органическом виде осталось без значимых изменений относительно исследований предыдущих лет.

Изменчивость содержания биогенных элементов в различные годы в деятельном слое моря связано с межгодовой изменчивостью гидрологической структуры, динамики вод и функционированием морских биологических сообществ. Влияние этих факторов на формирование запаса биогенных элементов в конкретный год/сезон может происходить как в одном, так и в противоположных направлениях. Поэтому выявление вкладов каждого из них на гидрохимический режим требует наличия комплексных (гидрохимия, гидрология, гидрофизика, биология) данных, и их совместного тщательного анализа.

# Распределения Chl-a, измеренного «in situ» на разрезе в 2017 г.

Распределение Chl-а является одной из важных характеристик функционирования экосистемы. Его количество, в значительной степени, определяет величину первичной продукции органического вещества в море и, следовательно, трофический статус района. Характер вертикального распределения Chl-а является показателем обеспеченности пищей фитофагов, обитающих на разных глубинах, и формирует особенности и пути трансформации и переноса энергии по пищевой цепи.

Распределение средней концентрации Chl-а в эвфотическом слое моря на разных станциях разреза в разные периоды наблюдений 2017 г. показано на рисунке 2.7. В апреле наблюдались самые высокие значения концентрации автотрофного фитопланктона на всех станциях разреза. Максимальные концентрации Chl-а были в прибрежной зоне, по мере удаления от берега концентрация фитопланктона снижалась. Такая же тенденция уменьшения концентрации Chl-а от берега в открытое море сохранялась до середины лета и, по-видимому, была связана с поступлением минеральных веществ с береговым стоком. В этот период значения средней концентрации в прибрежном районе были в 2 раза выше, чем в глубоководной части разреза. Во второй половине года значения средних концентраций Chl-а мало различались на разрезе от берега в открытое море, указывая на сходные условия минерального питания во всем районе исследования.



#### РИС. 2.7.

Сезонные изменения средней концентрации Chl-а в эвфотическом слое на разных станциях мониторингового разреза в 2017 г.

Таким образом, влияние берегового стока проявлялось главным образом в прибрежной зоне моря и имело убывающее влияние от весны к осени: от паводкового периода к относительно засушливому периоду середины и конца лета, что естественно.

Следует отметить высокое содержание Chl-а в апреле 2017 г. по сравнению с предыдущими 2015 и 2016 гг. (0.8-1.6 мг/м $^3$  и 0.4-0.6 мг/м $^3$  соответственно). Можно предположить, что это явление связано с холодной зимой 2016-2017гг., и как следствие, более глубокой конвекцией, поднявшей глубинные воды, богатые биогенными элементами. Сезонная динамика Chl-а в 2017 г. характеризовалась ярко выраженным весенним максимумом, летним минимумом и последующим осенне-зимним увеличением его концентрации (см. рис. 2.7).

Характер вертикального распределения Chl-а значительно изменялся в течение года (рис. 2.8). В значительной степени эти изменения были связаны с особенностями гидрофизического режима: температурной стратификацией, глубиной залегания сезонного термоклина, горизонтальным сдвигом скорости ОЧТ. В апреле до установления температурной стратификации моря высокие значения Chl-a (выше о.6 мг/м<sup>3</sup>) наблюдались во всем столбе воды. Максимальные значения (1.1-1.4 мг/м³) регистрировались в верхнем 20-метровом слое вдоль всего разреза (рис. 2.8а). В мае-июне по мере формирования температурного градиента концентрация Chl-а в верхнем 10-метровом слое снижается, а ее максимальные значения (0.8-1.0 мг/м<sup>3</sup>) совпадают по глубине со слоем температурного скачка (рис. 2.8б, в). Ниже 50 м содержание Chl-а не превышает о.2 мг/м<sup>3</sup>. Необычная для летнего периода картина вертикального распределения Chl-a наблюдалась в начале июля (рис. 2.8г). Узкий ярко выраженный максимум концентрации (1.5- $3.0 \text{ мг/м}^3$ ) был образован на глубине 10 м, при этом во всем слое воды глубже 25 м концентрация не превышала 0.2 мг/м³. В середине сентября концентрация Chl-a в верхнем квазиоднородном слое (0-20 м) снизилась до 0.2-0.4 мг/м<sup>3</sup> (рис. 2.8д). Максимальные значения составляли 0.6 мг/м³ и были приурочены к слою температурного скачка. В начале октября после сильного и продолжительного ветра северо-восточных румбов толщина ВКС увеличилась до 50 м, и максимальные значения Chl-а наблюдались над слоем скачка (рис. 2.8е).

Рисунок 2.9 иллюстрирует изменения характера вертикального распределения температуры и концентрации Chl-а до и после сильного шторма в конце сентября. Толщина верхнего квазиоднородного слоя после шторма увеличилась от 20 до 50 м, а профиль концентрации Chl-а с хорошо выраженным максимумом на глубине 25 м в слое температурного скачка (рис. 2.9б) сменился более равномерным распределением Chl-а в верхнем 50-метровом слое (рис. 2.9г). Сильный шторм вызвал двукратное увеличение количества Chl-а в верхнем 20-метровом слое на внешнем шельфе и склоне:  $0.19\pm0.01 \text{ мг/м}^3$  и  $0.37\pm0.2 \text{ мг/м}^3$  до и после шторма соответственно.

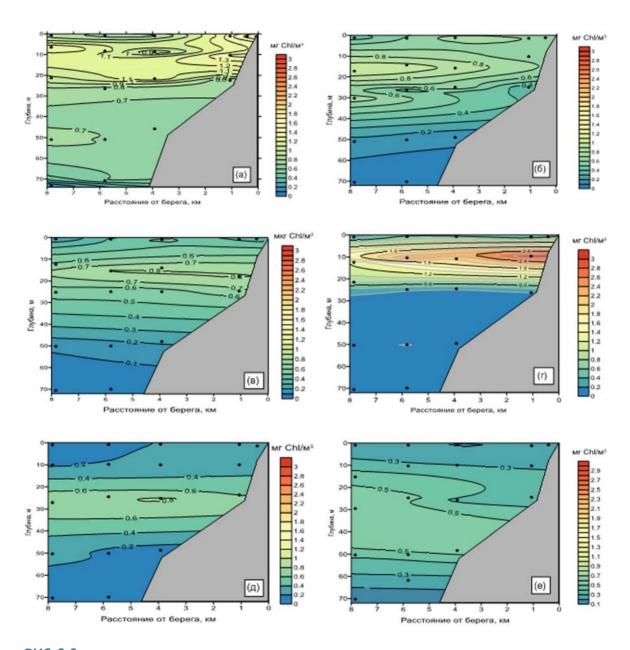


РИС. 2.8.

Вертикальное распределение Chl-а по мониторинговому разрезу в 2017 г. а - 15 апреля, б - 16 мая, в - 19 июня, г - 03 июля, д - 15 сентября, е - 05 октября

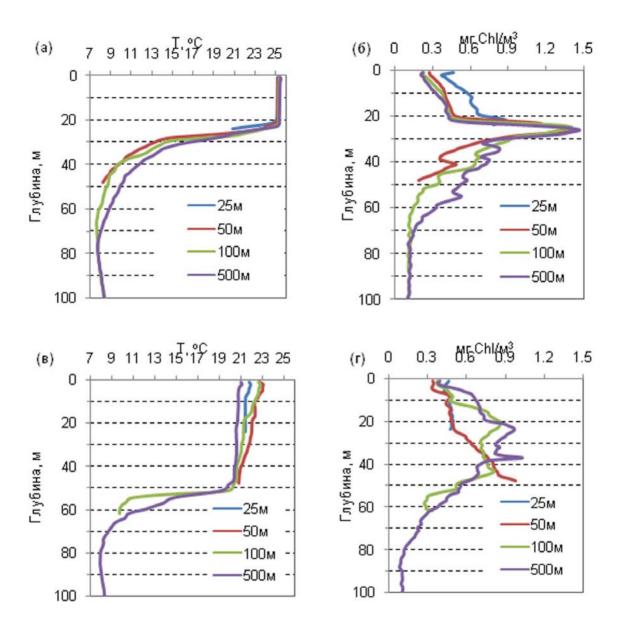


РИС. 2.9.

Вертикальные профили температуры (а, в) и концентрации Chl-а (б, г) до шторма (15 сентября 2017, верхняя панель) и после шторма (05 октября 2017, нижняя панель) на станциях мониторингового разреза с глубиной 25, 50, 100 и 500 м

## Динамика численности и биомассы мезозоопланктона

Годовая динамика численности, биомассы и таксономического состава мезозоопланктона на шельфе в 2017 г. представлена на рисунке 2.10. Максимум численности был отмечен в апреле за счет массового развития гетеротрофной динофлагелляты Noctiluca scintillans, численность которой достигала 6000 клеток/ $M^3$  (рис. 2.10a). Второй пик численности наблюдался в июле и был обусловлен развитием кладоцер, составлявших около 50% от общей численности зоопланктона. В остальное время года общая численность мезозоопланктона менялась незначительно, составляя 2-3 тыс экз/м<sup>3</sup>.

Биомасса зоопланктона (В), выраженная в единицах углерода, характеризовалась резким падением значений во второй половине года (рис. 2.10б).

Если в апреле- июле она составляла 12-15 мг С/м³, то в августе-декабре ее значения не превышали 6 мг С/м³. Возможно, причиной такого падения послужила высокая летняя температура и уменьшение количества растительной пищи в верхнем перемешанном слое.

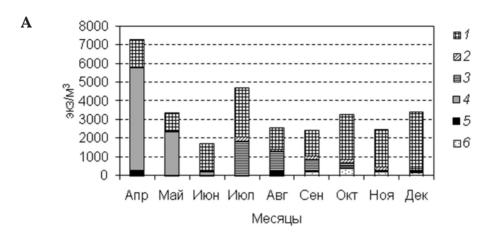
В течение всего исследованного периода копеподы составляли более половины всей биомассы зоопланктона, а в осенний сезон их роль возрастала до 80% от общей биомассы (рис. 2.10в). Хетогнаты присутствовали в планктоне в значительном количестве в течение всего года, образуя в среднем около 20% биомассы. В июле-сентябре происходило массовое развитие кладоцер. В этот период их вклад в общую биомассу составил 25-35%. Доля ноктилюки в общей биомассе была ниже 15%, несмотря на ее многочисленность, что связано с высоким процентным содержанием воды в теле этого организма.

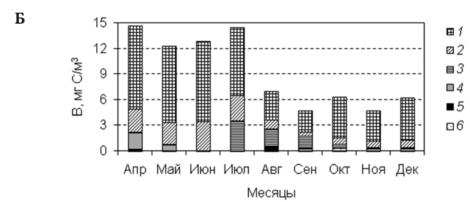
Средние для года значения биомассы мезозоопланктона составили 9.2±4.3 мг С/м<sup>3</sup>, что достоверно не отличается от значений, зарегистрированных в 2015-2016 гг.

## Распределение желетелого макрозоопланктона

Желетелый макропланктон представлен медузой Aurelia aurita и гребневикамивселенцами Mnemiopsis leidyi и Beroe ovata. A. aurita – автохтонный черноморский вид, оба гребневика вселились в Черное море в конце прошлого столетия. Все три вида являются хищниками высшего порядка (A. aurita и M. leidyi питаются зоопланктоном, а B. ovata является облигатным хищником, потребляющим лобатных гребневиков) и играют ведущую роль в формировании структуры сообщества и функционировании трофической сети черноморской пелагиали (Kideys, 2002).

Годовая динамика обилия желетелого макрозоопланктона в 2017 г. представлена на рис. 2.11. В 2017 г. сохранилась наблюдающаяся в последние пять лет тенденция к увеличению численности и биомассы медузы A. aurita. В течение всего года, за исключением середины лета, медузы доминировали по численности, составляя в среднем за год (среднее $\pm$ SE)  $13\pm2$  экз/м $^2$  с максимальными значениями 20-21 экз/м $^2$  (рис. 2.11а). Среднегодовая численность M. leidyi равнялась 5±2 экз/м², максимальные значения





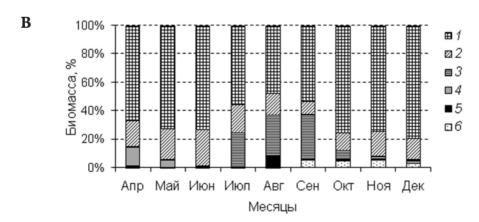
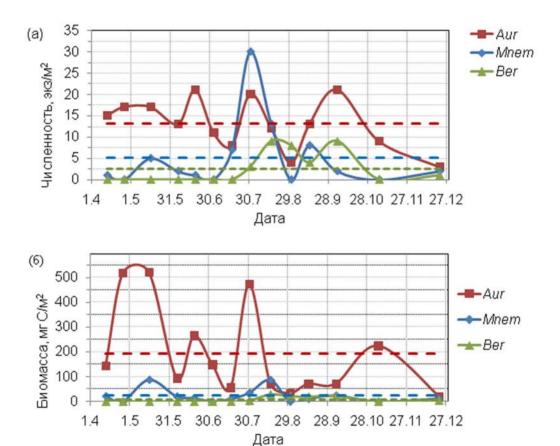


РИС. 2.10.

Годовая динамика численности (а), биомассы (б) и таксономической структуры (в) мезозоопланктона в шельфовой области северо-восточной части Черного моря в 2017 г. 1 - Copepoda, 2 - Chaetognatha, 3 - Cladocera, 4 - Noctiluca, 5 - larvae, 6 - varia

 $(30 \text{ экз/м}^2)$  наблюдались в конце июля в период массового развития вида. Гребневик B. ovata появился в моретольков серединелета; его численность в августе-октябре достигала  $9 \text{ 9K3/M}^2$ .

Среднегодовое значение биомассы медуз в единицах углерода (среднее±SE) составило 193 $\pm$ 48 мг С/м $^2$  (рис. 2.11б). Для гребневиков M. leidyi и B. ovata этот показатель равнялся  $23\pm8$  мг С/м² и  $7\pm3$  мг С/м² соответственно. В 2017 г. доля медуз достигла 87% общей среднегодовой биомассы желетелого макропланктона. Соответственно, доля гребневика вселенца M. leidyi сократилась до 10% общей среднегодовой биомассы желетелого макропланктона. Для сравнения, в 2005-2009 гг. медузы составляли около 60% биомассы (Арашкевич и др., 2015).

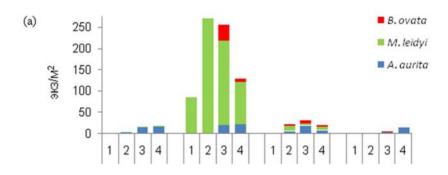


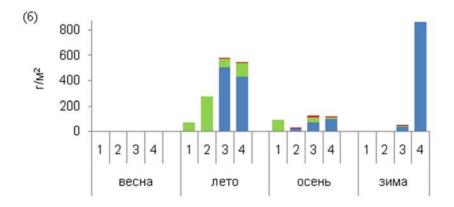
## РИС. 2.11.

Сезонная динамика численности (а) и биомассы (б) желетелого макрозоопланктона в прибрежном районе северо-восточной части Черного моря в 2017 г. (Aur – медуза Aurelia aurita; Mnem – гребневик Mnemiopsis leidyi; Ber – гребневик Beroe ovata)

Пространственные изменения численности и биомассы желетелого макрозоопланктона по разрезу от мелководья до континентального склона (глубины 10, 25, 50 и 500 м) в разные сезоны представлены на рисунке 2.12. Наибольшая численность и биомасса медузы A. aurita во все сезоны была отмечена на удаленных от берега станциях; в 2017 г. на мелководье медуза не была встречена. Численность и биомасса M. leidyi мало изменялась по разрезу, за исключением летнего сезона, когда максимальное обилие этого вида было отмечено на внутреннем шельфе.

Гребневик B. ovata появился в исследуемом районе только в конце июля, когда вода максимально прогрелась, а плотность популяции его кормового объекта – M. leidyi – достигла высокой численности. Распределение этого вида было ограничено главным образом срединным шельфом и областью склона. К зиме, с уменьшением количества пищи и понижением температуры воды берое практически исчез в акватории.





## РИС. 2.12.

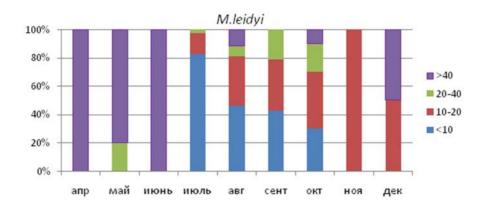
Численность (a) и биомасса (б) медузы Aurelia aurita и гребневиков Mnemiopsis leidyi и Beroe ovate на мониторинговом разрезе в 2017 г.

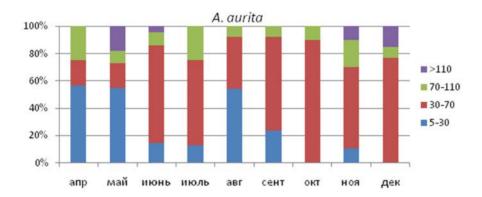
1 – мелководье, 2 – внутренний шельф, 3 – срединный шельф, 4 – континентальный склон

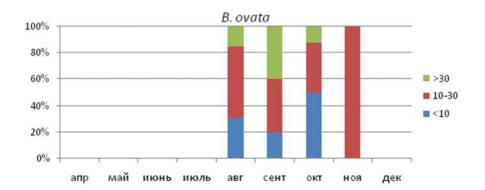
Сезонные изменения размерной структуры желетелого макрозоопланктона показаны на рисунке 2.13. У всех трех видов молодь в зимний период не встречалась, очевидно, в связи с похолоданием воды и прекращением размножения осенью. Однако, если у M. leidyi и A. aurita, питающихся кормовым зоопланктоном, после массового размножения летом наблюдалось увеличение доли крупных экземпляров, то в популяции B. ovata крупные особи так и не появились. По-видимому, это связано с тем, что в 2017 г. размножение мнемиопсиса началось на две недели позднее обычного, только во второй половине июля, и к августу популяция не достигла максимальной численности. Вследствие этого популяция B. ovata, вначале успешно размножившаяся, осенью оказалась не обеспеченной достаточным количеством пищи, запасы которой были подорваны в конце лета. Молодь медузы A. aurita встречалась в планктоне в течение почти всего периода исследований, кроме конца декабря. Наблюдалось два максимума молодых особей в популяции – весной и во второй половине лета. Размножение медуз, толерантных к температуре среды, начиналось в самом начале гидрологической весны, затем к лету наиболее крупные старые экземпляры отмирали, а подросшая весенняя генерация участвовала в размножении во второй половине лета.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 2

- I. Арашкевич Е.Г., Луппова Н.Е., Никишина А.Б., др. Судовой экологический мониторинг в шельфовой зоне Черного моря: оценка современного состояния пелагической экосистемы // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 964-964.
- 2. Подымов О.И., Зацепин А.Г. Сезонные изменения солености воды в Геленджикском районе Черного моря по данным судового мониторинга // Океанология. 2016. Т. 56. Nº 3. C. 370-383.
- Anninsky B.E. Organic composition and ecological energetics of jellyfish Aurelia aurita 3. L. (Cnidaria, Scyphozoa) under the Black Sea conditions // Trophic relationships and food supply of heterotrophic animals in the pelagic ecosystem of the Black Sea / Eds. Shulman G.E. et al. Istanbul: Black Sea Commission Publications, 2009. P. 99-160.
- Arashkevich E.G., Stefanova K., Bandelj V. et al. Mesozooplankton in the open Black Sea: 4. regional and seasonal characteristics // Journal of Marine Systems. 2014. V. 135. P. 81-96.
- 5. Finenko G.A., Romanova Z.A., Abolmasova G.I. et al. Population dynamics, ingestion, growth, and reproduction rates of the invader Beroe ovata and its impact on plankton community in Sevastopal Bay, the Black Sea // J. Plankton Res. 2003. V. 25(5). P. 539-549.
- 6. Kideys A.E. Fall and rise of the Black Sea ecosystem //Science. 2002. V. 297. № 5586. P. 1482-1484.
- Strickland J.D.H., Parsons T.R. A practical handbook of seawater analysis. Pigment 7. analysis // Bull. Fish. Res. Bd. Can. 1968. V. 167. P. 1–311.







# РИС. 2.13.

Сезонная динамика размерной структуры трех видов желетелого макропланктона. Размеры даны в мм

# АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ (НЕФТЕПРОДУКТОВ, ФЕНОЛОВ, СПАВ, ХОП, ПАУ, ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ДР.) В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ И В ДОННЫХ ОСАДКАХ ГЕЛЕНДЖИКСКОЙ И ГОЛУБОЙ БУХТ

Часовников В.К.<sup>т</sup>, Чжу В.П.<sup>т</sup>, Очередник О.А.<sup>т</sup>

# ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Программа исследований 3-го этапа экспедиции «Черное море-2017» нацелена на получение данных о содержании и изменчивости техногенных загрязнений (нефтепродуктов, фенолов, детергентов, тяжелых металлов и др.) в прибрежной зоне моря.

Цель работы – оценка уровня загрязняющих веществ в водной толще и донных осадках на пробных полигонах северо-восточной части Черного моря.

# Основные задачи работы:

- организация и проведение экспедиционных исследований;
- отбор проб воды и грунта;
- выполнение комплекса химико-аналитических исследований проб донных отложений и морской воды в стационарной лаборатории;
- обработка, интерпретация аналитических данных, оценка состояния морской среды.

Экспедиционные исследования выполнялись в прибрежной зоне Черного моря на акватории Геленджикской и Голубой бухт в весенний и летний периоды. Схема расположения станций полигонных съемок представлена на рисунке 3.1.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН E-mail: chasovn@mail.ru

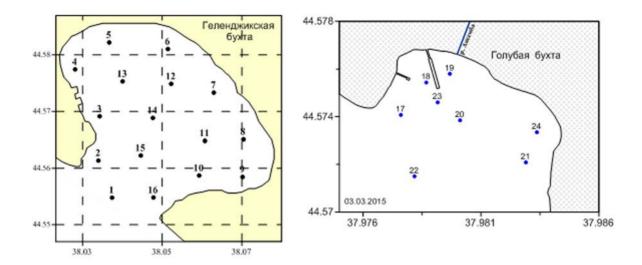


РИС. 3.1.

Схема расположения станций на полигонах в Геленджикской и Голубой бухтах

# МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения гидрохимических параметров в поверхностных водах были использованы стандартные методы, принятые в морских экспедиционных работах (РД 52.10.243-92, Руководство по химическому анализу морских вод, 1993).

Отбор проб в море проводился пластиковыми батометрами Нискина в соответствии с ГОСТ 17.1.5.05-85 «Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод». Сразу после отбора пробу переливали в посуду для хранения проб по ГОСТ 17.1.5.04-81 «Охрана природы. Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. Общие технические условия», в зависимости от определяемого компонента.

Пробы морской воды на содержание тяжелых металлов отбирались в пластиковые емкости. Перед отбором емкость трижды ополаскивалась пробой, затем заливалась проба. Консервация проб осуществлялась сразу после отбора. Консервация производится іМ раствором соляной кислоты (4.4. мл кислоты на 200 мл пробы), чтобы после добавления кислоты рН пробы составлял 2. На остальные техногенные загрязнения отбор проб осуществлялся в стеклянную тару согласно методике определения соответствующих химических параметров.

**Нефтепродукты.** Измерение массовой концентрации нефтепродуктов осуществляется по методике ПНД Ф 14.1:2:4.128-98. Метод основан на экстракции нефтепродуктов гексаном из пробы воды и измерении интенсивности флуоресценции экстракта на анализаторе жидкости «Флюорат-02 3М». Диапазон измерений – 0.005-50 мг/дм³. Погрешность метода на уровне предела обнаружения -25%.

**Фенол.** Измерение массовой концентрации осуществляем по методике ПНД Ф 14.1:2:4.182-02. Метод основан на извлечении фенолов из воды бутилацетатом, реэкстракции их в водный раствор гидроксида натрия и измерении их содержания по интенсивности флуоресценции фенолов после подкисления реэкстракта с использованием анализатора жидкости «Флюорат-02». Диапазон измерений – 0.0005-25 мг/дм $^3$ . Погрешность метода на уровне предела обнаружения – 40%.

**Детергенты.** Измерение массовой концентрации анионных поверхностно-активных веществ (АПАВ) осуществляем по методике ПНД Ф 14.1:2:4.158-2000. Метод основан на экстракции хлороформом ионных пар АПАВ с красителем акридиновый желтый и измерении массовой концентрации АПАВ в полученном экстракте флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости «Флюорат-02 3М». Диапазон измерений – 0.025-2 мг/дм³. Погрешность метода на уровне предела обнаружения – 40%.

**Ртуть** (**Hg**). Измерение массовой концентрации ртути осуществляется по РД 52.10.243-92 методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрометрии AAS (анализатор ртути «Юлия-5 КМ»). Диапазон измерений – 0.016-0.12 мкг/л. Погрешность метода на уровне предела обнаружения – 25 %.

**Общий марганец и железо** определялся фотометрически с применением формальдоксима и феррозина.

**Тяжелые металлы.** Измерение массовых концентраций кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, кадмия и свинца осуществляется по методике ПНД  $\Phi$  14.1:2:4.139-98 методом атомно-абсорбционной спектрометрии на атомно-абсорбционном спектрометре (AAC) КВАНТ-2А. Метод основан на измерении резонансного поглощения света свободными атомами определяемого металла при прохождении света через атомный пар исследуемого образца, образующийся в пламени. Диапазон измерения – от о.о. мг/дм³. Погрешность метода на уровне предела обнаружения – 30 %.

**Бенз**(а)пирен. Измерение массовой концентрации бенз(а)пирена в пробах природных, питьевых и сточных вод методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с флуориметрическим детектированием осуществляется по методике ПНД Ф 14.1:2:4.186-02. Метод основан на экстракции бенз(а)пирена из проб воды гексаном, концентрировании экстракта, при необходимости очистки его методом колоночной хроматографии, и определении бенз(а)пирена методом ВЭЖХ. Диапазон измерения – 0.5 – 500 нг/дм $^3$ . Погрешность метода на уровне предела обнаружения – 45 %.

**Пестициды** (ХОП и ПХБ). Измерение массовой концентрации хлорорганических пестицидов (ХОП) и полихлорированных бифенолов (ПХБ) в пробах питьевых, при-

родных и сточных вод методом газовой хроматографии осуществляется по методике ПНД  $\Phi$  14.1:2:4.204-04 с использованием электронно-захватного детектора после количественного извлечения анализируемых соединений гексаном и концентрирования экстракта. Диапазон измерения – 0.00001–0.05 мг/дм³. Погрешность метода на уровне предела обнаружения – 60 % (Газовый хроматограф «КристаЛюкс-4000М»).

Для аналитических определений использовалось оборудование Лаборатории химии ЮО ИО РАН:

- Атомно-абсорбционный спектрометр «КВАНТ-2А»
- Жидкостной хроматограф «Люмекс»
- Газовый хроматограф «КристаЛюкс-4000М»
- Флюорат 02 3М
- Анализатор ртути «Юлия-5 КМ»
- Фотоколориметры: Hach (Германия), КФК 3
- Титраторы: Metrohm (Германия), АТП-02 (Россия)
- Цифровая бюретка: «Digitrate 810» (США), «Аквилаб« (Россия)
- рН-метр И-500, WDW-330 і (Россия, Германия)
- Концентратомер (ИК) КН-2М
- Электронные весы AV264C (США)
- Деионизатор: Simplicity 185, D-301.
- Пластиковые 5-литровые батометры Нискина
- Дночерпатель Петерсена
- Оборудование, необходимое для функционирования химической лаборатории (дистилляторы, вытяжные шкафы, сушильные шкафы, химическая посуда и пр.).

В общей сложности выполнено около 1250 определений химических параметров в воде и грунте.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Прибрежные воды морей издавна активно эксплуатируются человеком, что ставит состояние их экосистем в прямую зависимость от характера этой деятельности. Изменения экологической обстановки в прибрежной зоне Черного моря требуют более тщательного изучения гидрохимического режима вод, гидрологической структуры и системы циркуляции вод (Sorokin, 2002; Часовников, Лукашов, 1994; Часовников, 2007; Часовников и др., 2016).

Выше нормы ПДК в 2017 году зафиксированы максимальные значения техногенных загрязнений для железа, марганца, свинца и ртути (таблица 3.1). Остальные изученные загрязняющие вещества находились в воде в концентрациях ниже ПДК.

В таблице 3.1 представлены минимальные, максимальные, средние за год величины, зафиксированные в Геленджикской и Голубой бухтах и отношения их средних значений, из которых видно, во сколько раз отличается содержание техногенных загрязнений в различных бухтах. В целом можно отметить более повышенный фон содержания техногенных загрязнений в водах Геленджикской бухты.

Так, например, средние концентрации для нефтепродуктов отличаются в 1.6 раза, фенола в 1.2 раза, железа в 3 раза, ртути в 2 раза, свинца в 1.7 раза, сумма ХОП - в 1.7 раза. Эти соотношения говорят о том, во сколько раз больше воды Геленджикской бухты подвержены антропогенной нагрузке по каждому из исследованных техногенных загрязнений по сравнению с Голубой бухтой.

Выполненные полигонные съемки отчетливо показывают характерное влияние малых рек и берегового стока, а также наиболее загрязненные участки бухт.

На рисунках 3.2 и 3.3 представлены распределения свинца и цинка в водах акватории Геленджикской и Голубой бухт по данным, полученным 13 июля 2017 года.

Из наиболее загрязненных участков акватории в Геленджикской бухте следует выделить в первую очередь юго-восточный район, прилегающий к месту впадения реки Су-Аран, где, по всей видимости, происходит наиболее интенсивное антропогенное воздействие и, как следствие, накопление загрязнений в осадках. Для Голубой бухты накопление загрязняющих веществ приурочено к пирсу ЮО ИО РАН и впадению реки Ашамба.

Исследования концентраций техногенных загрязнений в районе Геленджика показывают, что уровень содержания тяжелых металлов, нефтепродуктов, фенолов в 1,5-2 раза выше для акваторий с затрудненным водообменом и повышенной рекреационной нагрузкой по сравнению с другими прибрежными водами.

# ЗАГРЯЗНЕНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНЕ Г. ГЕЛЕНДЖИК

Для донных отложений морских акваторий в российских территориальных водах в настоящее время не существует нормативно закрепленных характеристик их качества по уровню концентраций загрязняющих веществ (ЗВ). Хотя содержание ЗВ в донных отложениях российскими нормативными документами не регламентируются, однако существует возможность оценивать степень загрязнения донных отложений в контролируемом районе на основе соответствия уровней содержания ЗВ критериям экологической оценки загрязненности грунтов по «голландским листам» (Neue Niederlandische Liste). Допустимые концентрации (ДК) в соответствии с зарубежными нормами представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.1. Диапазоны изменчивости и среднегодовые значения содержания загрязняющих веществ в воде Геленджикской и Голубой бухт в 2017 г.

Загрязняющее вещество	Геленджикская бухта, С(гел)			Голубая бухта, С (гол)			Отношение средних значений
вещество	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	<u>С (гел)</u>
Нефтепродукты, мг/л	0.005	0.036	0.018	0.002	0.028	0.011	1.6
Фенол, мкг/л	<0.05	0.4	0.2	<0.05	0.4	O.I	1.2
Детергенты (АПАВ), мг/л	0.000	0.040	0.014	0.000	0.050	0.017	0.8
Взвеш, в-во, мг/л	1.50	80.00	9.51	1.50	25.33	5.11	1.9
Железо (Fe), мг/л	0.004	0.169	0.036	0.003	0.068	0.012	3.0
Марганец (Mn), мг/л	0.008	0.326	0.074	0.004	0.351	0.063	1.2
Ртуть (Hg), мкг/л	0.016	0.250	0.046	0.016	0.070	0.023	2.0
Медь (Cu), мкг/л	0.40	4.02	2.03	0.40	4.30	2.41	0.8
Цинк (Zn), мкг/л	0.20	7.78	1.43	0.20	24.33	3.87	0.4
Кадмий (Cd), мкг/л	1.29	3.15	2.14	1.26	3.93	2.22	1.0
Свинец (Pb), мкг/л	2.00	14.34	5.07	2.00	5.49	2.91	1.7
Бенз(а)пирен, нг/дм³	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1.0
α-ГХЦГ (α-НСН), нг/дм³	<0.1	0.6	0.2	<0.I	<0.1	<0.1	2.2
$\gamma$ -ГХЦГ ( $\gamma$ -НСН), нг/дм $^3$	<0.1	0.7	0.3	<0.I	0.2	O.I	2.6
$\beta$ -ГХЦГ ( $\beta$ -НСН), нг/дм $^3$	<0.1	0.6	0.3	<0.I	0.4	0.2	1.4
4,4'-DDE, нг/дм <sup>3</sup>	<0.I	1.6	0.5	<0.I	0.6	0.3	1.7
4,4'-DDD, нг/дм <sup>3</sup>	<0.1	0.8	0.3	<0.I	<0.1	<0.1	3.3
4,4'-DDT, нг/дм <sup>3</sup>	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.0
Гептахлор, нг/дм³	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.0
Гексахлорбензол (ГХБ), нг/дм³	<0.1	0.3	0.2	<0.1	0.2	0.1	1.3
Σ Pesticides, нг/дм³	0.8	3.7	1.9	0.8	1.7	I.I	1.7

<sup>\*</sup> Зафиксированные превышения ДК выделены в таблице серым цветом.

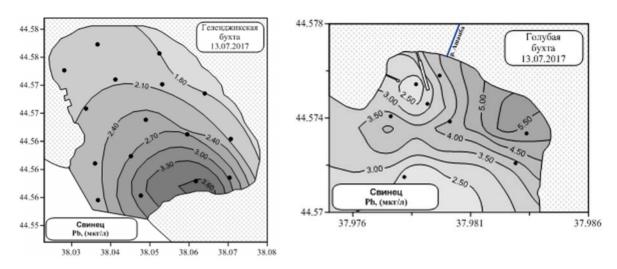


РИС. 3.2.

Содержание в воде свинца (мкг/л) в Геленджикской (слева) и Голубой (справа) бухтах 13 июля 2017 г.

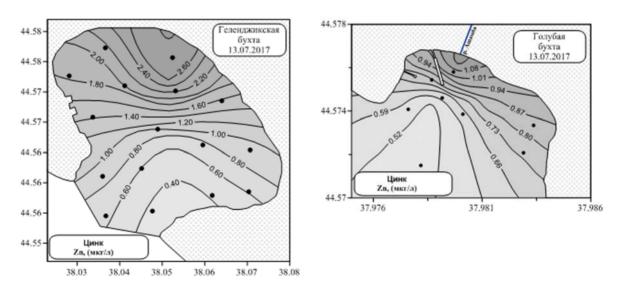


Рис. 3.3.

Содержание в воде цинка (мкг/л) в Геленджикской (слева) и Голубой (справа) бухтах 13 июля 2017 г.

	. ,	•	
Загрязняющее вещество	ДК*	Загрязняющее вещество	дк*
Ртуть, мкг/г	0.3	Цинк, мкг/г	140
Медь, мкг/г	35	Свинец, мкг/г	85
Никель, мкг/г	35	Нефтепродукты, мкг/г	50
Кадмий, мкг/г	0.8	Бенз(а)пирен, нг/г	25
Кобальт, мкг/л	20	γ-ГХЦГ(линдан), нг∕г	0,05
Хром, мкг/л	100	ΣЛЛТ. ЛЛЛ и ЛЛЭ. нг/г	2.5

Таблица 3.2. Допустимые концентрации загрязняющих веществ в донных отложениях водоемов в соответствии с зарубежными нормами

ДК\* - (Neue Niederl...; Warmer, van Dokkum, 2002)

В 2017 году были выполнены исследования уровней содержания загрязнений донных осадков в Геленджикской и Голубой бухтах (схему станций см. на рис. 3.1). Для оценки экологического состояния в поверхностном слое осадков (O-5 см) выполнены определения содержания: нефтепродуктов (НП), тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb, Mn, Fe).

В таблице 3.3 приведены статистические данные уровня загрязняющих веществ для донных осадков в акватории Геленджикской и Голубой бухт. На рисунках 3.4 – 3.5, как и для воды (см. рис. 3.2 и 3.3), приводится распределение концентраций свинца и цинка в донных осадках на исследуемых полигонах.

В 2017 году только для нефтепродуктов в Геленджикской бухте (табл. 3.3) были зафиксированы величины выше существующих норм (Neue Niederl...). Превышение допустимых концентраций для остальных техногенных загрязнений не обнаружено. Содержание железа и марганца не лимитируются современными нормативными документами.

Для сравнения, в таблице 3.3 приводятся данные о величинах содержания загрязняющих веществ в донных осадках Голубой и Геленджикской бухт – акваторий с разным уровнем антропогенного воздействия.

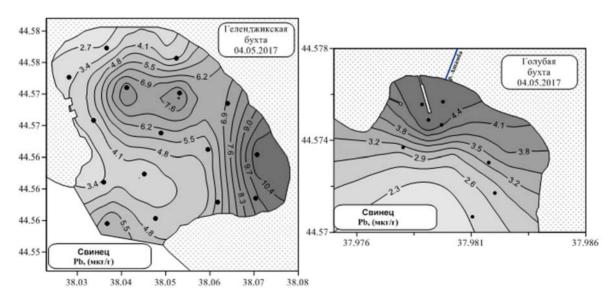
В целом следует отметить, что для донных осадков Геленджикской бухты характерен повышенный фон содержания техногенных загрязнений (ТЗ), по сравнению с Голубой бухтой (табл. 3.3, рис. 3.4 и 3.5). Превышение концентраций ЗВ в Геленджикской бухте по сравнению с Голубой (Cren/Cron) составляет: для нефтепродуктов в 1.8 раза, кадмия – 2.3, цинка – 2.2, меди почти в 2 раза.

Данные по уровню концентраций загрязняющих веществ, полученные в 2017 году, хорошо согласуются с полученными ранее результатами (Часовников и др., 2015, 2016).

Таблица 3.3. Диапазоны изменчивости и среднегодовые значения содержания загрязняющих веществ в донных осадках Геленджикской и Голубой бухт в 2017 г.

Загрязняющее	Геленджикская бухта, С(гел)			<b>Голубая бухта,</b> С (гол)			Отношение средних значений
вещество	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	<u>С (гел)</u> <u>С (гол)</u>
Нефтепродукты, мг/кг	5	74.6	10.28	5	10.91	5.74	1.8
Марганец (Mn), мг/кг	0.16	0.44	0.30	0.16	0.4	0.26	1.2
Железо (Fe), мг/кг	1.63	9.85	4.73	1.54	3.26	2.25	2.1
Медь (Cu) мкг/г	2.02	21	7.34	2.I	7.22	3.73	1.97
Цинк (Zn) мкг/г	5.48	53.8	20.61	4.93	15.84	9.45	2.2
Кадмий (Cd) мкг/г	0.02	0.35	0.05	0.02	0.05	0.02	2.3
Свинец (Pb) мкг/г	2.59	11.25	5.60	2.14	4.72	3.54	1.6

Зафиксированные превышения ДК выделены в таблице серым цветом.



#### Рис. 3.4.

Распределение свинца (мкг/г) в донных осадках Геленджикской (слева) и Голубой (справа) бухт 4 мая 2017 г.

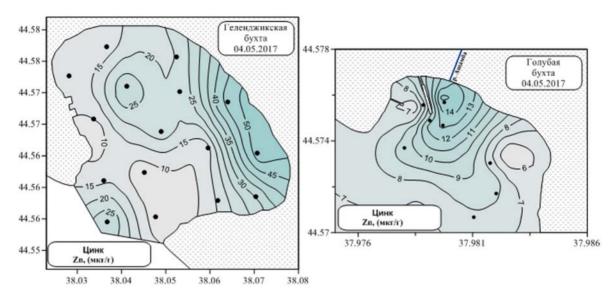


РИС. 3.5.

Распределение цинка (мкг/г) в донных осадках Геленджикской (слева) и Голубой (справа) бухт 4 мая 2017 г.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для прибрежных вод моря в районе г. Геленджик средние величины загрязняющих веществ не имеют устойчивого превышения существующих норм предельно допустимых концентраций. За весь период наблюдений в 2017 году только для марганца, зафиксированы средние за год концентрации выше ПДК.

Тем не менее, полученные диапазоны изменчивости загрязняющих веществ показывают, что для вод Геленджикской и Голубой бухт часто наблюдаются локальные максимумы концентраций, превышающие нормы ПДК. Так, за период 2017 г. зафиксировано превышение нормы содержания для таких параметров, как железо, марганец, свинец и ртуть.

Сравнительный анализ концентраций ЗВ в водах Геленджикской и Голубой бухт показывает, что уровень техногенных загрязнений этих акваторий отличается существенным образом. Для Геленджикской бухты в целом следует отметить стабильно повышенный фон содержания практически всех загрязняющих веществ. Например, для 2017 года расхождения наблюдаемого химического фона ЗВ в Геленджикской бухте по сравнению с Голубой бухтой (Сгел/Сгол) составляет: для нефтепродуктов в 1.6 раза, фенола в 1.2 раза, железа в 3 раза, ртути в 2 раза, свинца в 1.7 раза, сумма ХОП - в 1.7 раза.

В донных осадках Геленджикской бухты выше нормы допустимых концентраций зафиксированы значения величин содержания нефтепродуктов, что говорит о загрязнении акватории в районе г. Геленджик нефтяными углеводородами.

Области повышенных величин содержания ТЗ в донных отложениях, как правило, совпадают с наиболее часто встречающимися максимумами ЗВ в поверхностных водах. Для осадков Геленджикской бухты характерны более высокие уровни концентраций техногенных загрязнений, чем для Голубой бухты.

Из наиболее загрязненных участков акватории в Геленджикской бухте следует выделить в первую очередь юго-восточный район, прилегающий к месту впадения реки Су-Аран, где происходит наиболее интенсивное антропогенное воздействие и, как следствие, накопление загрязнений в осадках.

Для распределения различных загрязняющих веществ в грунтах акватории Голубой бухты характерен максимум величин в районе причала ЮО ИО РАН, что связано с постоянным источником поступления ЗВ, которым является стоянка судов и вынос реки Ашамба с аккумуляцией взвеси в этом районе.

Выполненные в течение 2017 года работы по исследованию уровня содержания загрязняющих веществ в водной толще и в донных осадках Геленджикского района позволили собрать обширный материал, требующий дальнейшей обработки. Высокие концентрации загрязняющих веществ в донных осадках являются следствием их постепенного накопления в течение десятилетий в условиях непрерывного процесса поступления этих веществ в результате антропогенного воздействия на морскую среду.

Различные условия водообмена и уровни техногенной нагрузки формируют особенности гидрохимического режима, характерные для каждого из исследуемых районов. Полученные результаты говорят о реальном негативном воздействии хозяйственной деятельности человека на гидрохимический режим акваторий с затрудненным водообменом. Проведенный цикл гидрохимических исследований указывает на необходимость мониторинга этих участков побережья, чтобы иметь представление о степени вероятности возникновения негативных явлений, связанных с процессами накопления техногенных загрязнений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 3

ГЛАВА 3

- 1. Руководство по химическому анализу морских вод. РД 52.10.243\_02 // Гидрометеоиздат. СПб. 1993. 264 с.
- 2. Часовников В.К., Чжу В.П., Очередник О.А., Марьясова Е.С. Оценка уровня техногенных загрязнений в прибрежной зоне Черного моря в районе Геленджика // Океанология. 2016. Т. 56.  $N^{o}$  1. С. 76-80.

- 3. Часовников В.К., Чжу В.П., Очередник О.А., Марьясова Е.С. Загрязнение донных осадков в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // XXI Международная научная конференция (школа) по морской геологии «Геология морей и океанов» (16-20 ноября 2015 г.). Москва. ИО РАН, 2015.
- 4. Часовников В.К. Гидрохимический режим акваторий с затрудненным водообменном в условиях антропогенной нагрузки // М-лы конф.: Проблемы управления и устойчивого развития прибрежной зоны моря. Геленджик. 2007. С. 295-298.
- 5. Часовников В.К., Лукашев Ю.Ф. Гидрохимический режим прибрежной части Черного моря в районе Большого Геленджика // Сб. Комплексные исследования техногенного загрязнения в прибрежной зоне Кавказского шельфа Черного моря. Роскомнедра: ГПНИПИокеангеофизика. Геленджик. 1994. С. 56-67
- 6. Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95.
- 7. Sorokin Yu. The Black Sea. Ecology and Oceanography // Backhuys Publishers. Leiden. 2002. P. 875.
- 8. Warmer H., van Dokkum R. Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice 2001, RIZA report 2002.009. Lelystad, 2002. 77 p.

# МОНИТОРИНГ ПРИБРЕЖНЫХ ДОННЫХ СООБЩЕСТВ

Симакова У.В.<sup>1</sup>, Семин В.Л.<sup>2</sup>, Любимов И.В.<sup>1</sup>, Свасян В.А.<sup>1</sup>, Тимофеев В.Л.<sup>3</sup>, Басин А.Б.<sup>1</sup>, Григоренко К.С.<sup>2</sup>, Колючкина Г.А.<sup>1</sup>

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЭТАПА ИССЛЕДОВАНИЙ

К концу XX – началу XXI века одной из наиболее значительных составляющих в эволюции биосферы стали биологические инвазии (Шадрин, 2000). Наиболее подвержены инвазиям нарушенные, обедненные и эволюционно молодые экосистемы (Сверлова, Сон, 2006). Одним из ярких примеров такого рода является Черное море (Zaitsev, Ozturk, 2001). Его экосистема с начала XX в. до конца 70-х годов считалась совершенно стабильной (Зенкевич, 1956; Киселева, Славина, 1972; Киселева, 1981). На рыхлых грунтах основными доминантами были двустворчатые моллюски. Ниже пояса скал, на глубинах 10-30 м располагался пояс «венусового песка» с доминированием Chamelea gallina (прежнее название Venus gallina), глубже (30-50 м) – мидиевый ил (Chamelea qallina), сменяющийся на глубинах около 60 м фазеолиновым илом (Modiolula phaseolina) (Зернов, 1913; Киселева, 1981). И даже появление и распространение в конце 40-х - 50-х годах хищного брюхоногого моллюска-вселенца Rapana venosa (Старк, 1950; Чухчин, 1961) не привело к изменениям в структуре основных поясных сообществ (Киселева, Славина, 1966). Однако в конце XX - начале XXI в. произошли кардинальные перестройки сообществ, выражающиеся в падении разнообразия, сдвиге нижней границы обитания макрофитобенто-

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

 $<sup>^{2}</sup>$  Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Институт морских биологических исследований РАН, Севастополь, Россия. E-mail: yankazeisig@gmail.com

са на меньшие глубины (Максимова, Лучина, 2002), смене доминантов и колебаниях численности характерных видов макрозообентоса (Gomoiu, Petran, 1973; Dumitrache, Abaza, 2004; Золотарев, Терентьев, 2012; Чикина, 2009). Причиной этих изменений явилось массированное и многофакторное внешнее воздействие: интенсивная эвтрофикация в 1970-1980-х годах, вызвавшая перестройки в сообществах планктона и фитали (Maximova, Moruchkova, 2005), и вселение чужеродных видов (Виноградов и др., 1992; Bologa et al., 1995). И если на северо-западе Черного моря пик эвтрофикации и изменений в донных сообществах пришелся на 1980-е гг., то на северо-кавказском побережье наиболее значимые преобразования были отмечены в начале XXI века (Кучерук и др., 2002, 2012).

В районе Северного Кавказа в 2001 г. было отмечено смещение ядра сообщества «венусового песка» с 25 м на 10-15 м и смена доминантов на 20-30 м на пелофильного вселенца Anadara kaqoshimensis (Bivalvia, Arcidae) (Чикина, 2009). Однако уже к 2005 г. в результате пресса рапаны и повышения конкурентноспособности автохтонных двустворчатых моллюсков-пелофилов Pitar rudis и Gouldia minima благодаря снятию пресса мнемиопсиса на их личинок произошло снижение роли анадары и повышение биоразнообразия и роли местных видов в бентосе (Chikina et al., 2014; Колючкина и др., 2017а; Колючкина и др., 2018). Таким образом, распределение бентоса в 2010-х стало более близким к периоду до эвтрофикации, однако сохранялось принципиальное отличие: на большинстве исследованных станций глубины 20-30 м были заняты сообществом пелофилов на илистом субстрате, а ядро венусового песка оставалось на глубинах 10-15 м (Селифонова, Часовников, 2017; Колючкина и др., 2018). Кроме того, исследования начала XX в. были посвящены преимущественно глубинам 10-30 м, где отмечались наибольшие колебания бентоса. Работы, касающиеся сообществ мидиевого и фазеолинового поясов, были единичными (Селифонова, Часовников, 2017). Кроме того, как исторические, так и современные данные по структуре сообществ были получены в разные сезоны года, что существенно затрудняет трактовку данных по короткоживущим видам (полихеты, ракообразные, некоторые моллюски и пр.), а в литературе данные по сезонной динамике отдельных видов бентоса в Черном море крайне ограничены. Поэтому основной задачей этапа экспедиции «Черное море-2017» по исследованию донных сообществ стало изучение макрозообентоса глубин 10-70 м на четырех разрезах на участке побережья Новороссийск – Туапсе, исследование сезонной динамики на одном из разрезов (в районе Голубой бухты), а также изучение факторов, определяющих вертикальную зональность бентоса и его динамику.

Если в сообществах рыхлых грунтов основные изменения были связаны с видамиинтродуцентами, то в сообществах фитали до 2016 г. роль инвазивных видов была незначительной. В ходе экспедиции «Черное море-2016» нами был обнаружен новый для Черного моря вид макроводорослей *Bonnemaisonia hamifera Hariot*, вселение которого носит инвазивный характер, а влияние на экосистему гипотетически огромно. Существует несколько примеров успешных инвазий макроводорослей в экосистемы Средиземноморского региона, в результате которых произошли изменения как в бентосных, так и пелагических сообществах на разных трофических уровнях (Boudouresque, Verlaque 2002; De Villèle, Verlaque, 1995; Piazzi, Balata, 2009). Однако в Черном море до сих пор значительного эффекта, оказываемого водорослями-вселенцами, не наблюдалось. Поэтому необходимо исследование этой инвазии у российского побережья Северного Кавказа: еще одной задачей экспедиции «Черное море – 2017» стало исследование географического и биотопического распространения нового вида и оценка его роли в современных сообществах обрастаний скал.

Исследование изменений структуры бентоса невозможно без изучения факторов, ее определяющих. Гидрологическая структура вод и свойства донных осадков являются ведущими факторами, влияющими на состав и структуру макрозообентоса рыхлых грунтов. Температура и соленость вод являются ключевыми факторами, определяющими возможность существования организмов той или иной группы, а придонная гидродинамика влияет на структуру сообществ как прямо, так и опосредованно через организацию донных осадков (Pearson, Rosenberg, 1987). На северо-восточном узком шельфе Черного моря в прибрежной зоне выделяются две водные массы, представляющие принципиальную важность для макрозообентоса рыхлых грунтов: верхний перемешанный слой с переменными температурными условиями (0-45 м) и зона с постоянными температурными условиями (50-70 м) (Зацепин и др., 2007; Кныш и др., 2011). Особый интерес представляет для исследования макрозообентоса слой сезонного скачка температуры – зона термоклина, расположенная на глубинах от 15 до 45 м по разным оценкам и в разное время (Зацепин и др., 2007; Кныш и др., 2011). Именно для этой зоны отмечается затухание интенсивности волнения, а также накопление в грунте, соприкасающемся с ним, повышенного количества илистых частиц и органического вещества, что в свою очередь, по всей видимости, определило облик донных сообществ в начале XXI в. (Колючкина и др., 2018). Однако большинство исследований макрозообентоса и гидрологической структуры вод разнесены в пространстве и времени, поэтому в настоящей работе сделана попытка проведения макрозообентосной съемки с параллельным исследованием значений наиболее важных факторов окружающей среды (гидрология, гранулометрический состав донных осадков и окислительно-восстановительный потенциал поровой воды).

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

Начиная с 2001 г. в рамках Черноморской экспедиции выполняется ежегодный мониторинг по двум разрезам на северо-восточном побережье Черного моря для выявления ежегодных изменений в структуре макрозообентосных сообществ (бухта

Инал, поселок Дивноморское) на глубинах 10-30 м. В 2017 г. кроме этой основной задачи исследованиями решались следующие:

- продолжение наблюдений долговременных изменений состава и структуры сообществ макрозообентоса на двух стандартных разрезах непрерывного мониторинга: «Инал» и «Дивноморское», и на дополнительном разрезе «Шепси»;
- исследование состояния и сезонных изменений макрозообентоса на глубине 35-70 м;
- -исследование видового состава пояса ильной мидии на глубинах 30-50 м;
- -исследование факторов, определяющих современное распределение донных сообществ макрозообентоса (тип донных осадков, их окислительно-восстановительный потенциал, гидрологическая структура вод);
- сбор образцов беспозвоночных (Decapoda, Amphipoda, Mollusca, Polychaeta) фауны Черного моря для морфологических и генетических исследований;
- изучение распространения и экологии нового вселенца Bonnemaisonia hamifera.

Работы выполнены в три этапа. Первый этап работ проходил весной, второй летом, а третий – осенью 2017 г. Во время первого и третьего этапов работы выполняли в районе Голубой бухты (ЮО ИО РАН) для сбора материала по исследованию сообществ на глубинах 35-70 м и сезонной динамики макрозообентоса, а также в районе Керченского пролива, в Таманском заливе и на побережье Азовского моря (Ясенская коса, Кучугуры) (рис. 4.1). В течение второго этапа был проведен сбор проб беспозвоночных для морфологических и генетических исследований и данных для многолетнего мониторинга сообществ макробентоса Черного моря на четырех стандартных разрезах, а также собран материал для исследований Воппетаізопіа hamifera. Обследования побережья Азово-Черноморского региона для поиска возможных районов распространения В. hamifera проводились в Голубой и Геленджикской бухтах, бух. Инал, в районе заповедника «Утриш», п. Джанхот, Керченского пролива, Таманского залива, Ясенской переправы, Бейсугского лимана и п. Кучугуры в весенне-летне-осенний периоды. Предварительные результаты исследований были опубликованы в тезисах конференции МАRESEDU-2017 (Симакова, Смирнов, 2017).

Работы по сбору макрозообентоса проводили с борта МНИС «Ашамба». Образцы собирали с помощью дночерпателя Океан о.1 (о.1 м²), дночерпателя Петерсена (о,о37 м², использовали по техническим причинам только весной в Голубой бухте на глубинах 40 м и 50 м) и малым тралом Сигсби (ширина 0.9 м) на глубинах от 7 до 70 м. Пробы, полученные с помощью дночерпателя, промывали на сите с ячеей 0.5х0.5 мм и фиксировали 4-6%-м формалином, приготовленным на морской воде. На станции отбирали 3 дночерпательных пробы для количественного исследования макрозообентоса и I дночерпательную пробу использовали для описания грунта, отбора проб на гранулометрический состав, измерение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) поровой воды донных осадков и исследования сообществ мейо- (пробоотборник – цилиндр,



РИС. 4.1.

Район работ экспедиции на МНИС «Ашамба» на Черном море в 2017 г.

площадь 2 см²) и микрофитобентоса (цилиндр, площадь 1 см²). Образцы мейо- и микрофитобентоса фиксировали 8%-м формалином, приготовленным на фильтрованной через сито морской воде (размер ячеи 100 мкм). Пробы для определения гранулометрического состава помещали в зип-пакеты и хранили в холодильнике в сыром виде. Анализ проб проведен сотрудниками Аналитической лаборатории ИО РАН. ОВП поровой воды регистрировали послойно (0–1 и 1–5 см) с помощью портативного ОВП-метра SanXin SX630. Значения ОВП приведены с коррекцией на потенциал стандартного водородного электрода (+200 мВ) (Розанов, 1988).

Пробы, полученные с помощью трала, промывали на борту судна на сите (0.5х0.5 мм), предварительно определяли видовой состав таксоцена моллюсков, нали-

чие и состав мертвой ракуши. Фотографировали разложенные в поддоне пробы с этикеткой и линейкой и фиксировали образцы организмов для последующего морфологического и генетического анализа 96%-м спиртом. На следующий день осуществлялась подмена спирта. Пробы хранили в холодильнике (+4 °C, для морфологического анализа) и морозильнике (-18°C, для генетического анализа).

Первичный разбор проб макрозообентоса проводили в Южном отделении ИО РАН и в лаборатории в Москве с использованием бинокуляров Микромед и Leica. Идентификацию животных проводили по возможности до видового уровня. При идентификации использованы определители фауны Черного (Киселева, 2004; Grintsov, Sezgin, 2011; Мордухай-Болтовской, 1968-1972) и Средиземного (Bellan-Santini et al., 1982, 1989) морей. Проверка валидности видовых названий (на октябрь 2017 г.) осуществлялась согласно международной базе данных WoRMS. Статистический анализ данных проводили попробно и постанционно, для чего рассчитывали среднее арифметическое биомассы и численности каждого вида в трех пробах и суммарное число видов во всех пробах станции. Для анализа видового богатства и разнообразия использовали индексы Шеннона, Пиелу, Маргалефа (Clarke, Warwick, 2001). Ординация сообществ по количественным показателям (численность и биомасса видов в пробах) проведена методом непараметрического многомерного шкалирования (MDS) на основе индекса сходства Брея-Кертиса. Достоверность группировок проверяли методом ANOSIM. Уровень значимости принимали равным 0.1%. Достоверность результатов MDS определяли по графику Шепарда. Метод SIMPER использовали для определения видов, вносящих наибольший вклад в сходство/различие в группах. Достоверность отличий между массивами данных определяли методом непараметрической статистики permutational ANOVA (PERMANOVA) в пакете Primer. Различия считали достоверными при уровне значимости p<0.05. Расчеты проводили в программе Primer v. 6.1.16 с расширением PERMANOVA 1.0.6. (Clarke, Gorley, 2006).

Непараметрический анализ корреляций по Спирману проводили в программе Statistica 12 (Statsoft Inc.). Корреляцию считали достоверной при уровне значимости p<0.05 с поправкой Холма-Бонферрони на количество сравнений (Abdi, 2010).

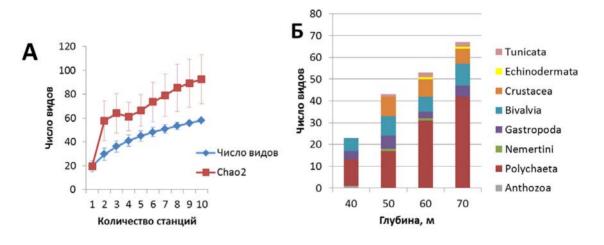
Во время экспедиционных выходов НИС «Ашамба» 27 июня – 2 июля 2017 года было выполнено 38 станций вертикального СТD-профилирования. Работы выполнялись с помощью зонда SBE 19 plus. Обработка данных производилась с помощью программного обеспечения фирмы-производителя зонда Sea-Bird Electronics. Максимальная достигнутая глубина составила 75.4 м на станции 19.

Для уточнения распространения нового вселенца в Черное море *Bonnemaisonia hamifera* учитывали ее обнаружение во всех пробоотборниках: дночерпателе и трале. Образцы собирали и фиксировали 4%-м формалином для дальнейшего морфологического анализа.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследования вертикальной структуры макрозообентоса на глубинах 40-70 м (весна) в районе Голубой бухты

Донные осадки глубин 40 м были представлены крупной ракушей с песком, на 50 м - заиленным песком, а на 60-70 м - илом. Было обнаружено 58 видов макрозообентоса. Кривая не выходила на плато, поэтому была проведена оценка ожидаемого числа видов (рис. 4.2 A). Число видов с поправкой Chao2 составило 93 $\pm$ 21 вид. Превышение значения показателя Chao2 на 37% говорит о неполном выявлении фауны, что, очевидно, обусловлено малым количеством станций.



#### РИС. 4.2.

Кривая накопленного числа видов (число видов) и ожидаемого числа видов (Chao2) макрозообентоса (A) и соотношение числа видов макрозообентоса на разных глубинах (Б) в районе Голубой бухты

Число видов линейно возрастало с глубиной от 23 на 40 м до 67 на 70 м (рис. 4.2 Б). Ведущую роль по числу видов играли полихеты (40-60% всех видов сообщества). Макрозообентос на глубине 40 м отличался не только бедностью видового состава, но и представленностью различных крупных таксонов, здесь встречались только Anthozoa, Polychaeta и Mollusca. Возможно это было связано с орудием сбора, так как на глубинах 40 м и 50 м использовали дночерпатель Петерсена с площадью захвата 0,037 м². Таким образом, обловленная площадь была почти в три раза меньше, чем на глубинах 60-70 м, где пробы собирали дночерпателем «Океан 0.1» с площадью захвата 0,1 м².

Echinodermata появлялись только на глубине 60 м, а Anthozoa были отмечены только на 40 м. Polychaeta и Bivalvia достигали наибольшего видового разнообразия на глубине 70 м. Численность макрозообентоса составила от 856 до 3310 экз/м $^2$ . Она в целом

увеличивалась с глубиной, достигая максимума на 60 м (рис. 4.3 A). По численности на всех глубинах доминировали полихеты. Их доля непрерывно возрастала с глубиной от 52 до 89%.

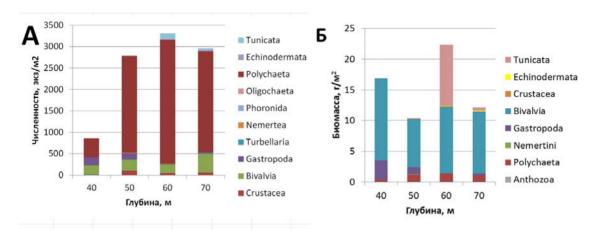


РИС. 4.3.

Численность (А) и биомасса (Б) макрозообентоса на разных глубинах

Биомасса макрозообеноса не превышала 25 г/м $^2$ . Она достигала двух максимумов – на глубинах 40 и 60 м. Основными доминантами по биомассе были двустворчатые моллюски (до 85%), однако на глубине 60 м большой вклад давали асцидии (до 45%) (рис.4.3 Б).

Наибольших значений индексы разнообразия достигали на глубине 40 м (рис. 4.4 A). Здесь за счет чрезвычайно низкой относительно других глубин численности ожидаемое число видов на 100 экземпляров достигало 23 (рис. 4.4 Б). Выравненность распределения обилий видов Пиелу на глубинах 50-70 м была сходной, а индекс разнообразия Шеннона и видового богатства Маргалефа линейно возрастали с глубиной в этом диапазоне.

Ординация данных как по стандартизированной численности, так и по биомассе макрозообентоса показала, что станции глубин 50-70 м были на 40% сходны между собой и отличались от станции глубины 40 м на 80% или более (рис. 4.5). Основной вклад в сходство и различия между станциями по численности вносили полихеты Aricidea claudiae, Heteromastus filiformis и Oriopsis armandi, а также двустворчатый моллюск Parvicardium simile. По численности именно эти виды доминировали в сообществах глубин 50-70 м (до 90% численности в сообществе). На глубине 40 м по численности наибольший вклад вносил брюхоногий моллюск Calyptrea chinensis (18% численности) и полихета Pholoe inornata (10% численности). Здесь были отмечены наибольшие значения выравненности обилий видов (индекс Пиелу) в отличие от станций других глубин.

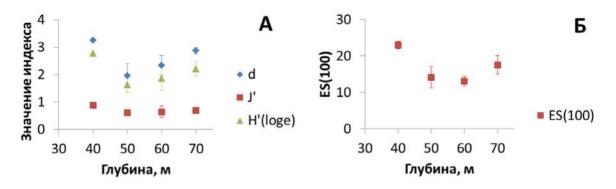
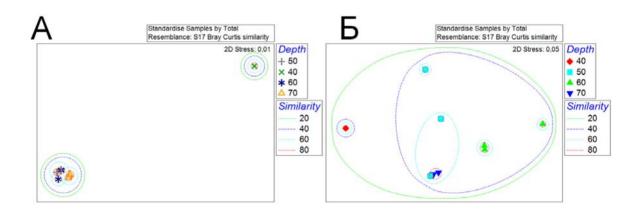


РИС. 4.4.

Значения индексов видового богатства Маргалефа (d), разнообразия Шеннона (H') и выравненности распределения обилий видов Пиелу (J') на разных глубинах (A) и ожидаемое число видов на 100 экземпляров ES(100) (Б)

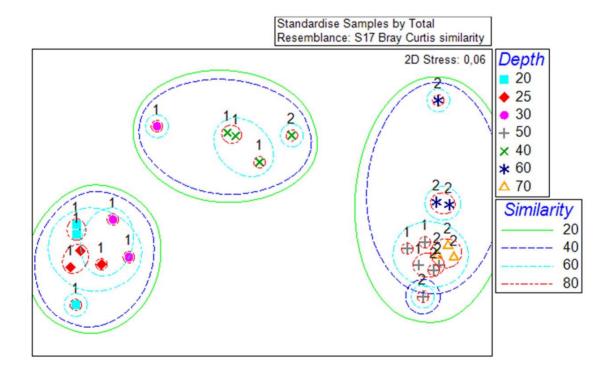


### РИС. 4.5.

Ординация проб на разрезе в районе Голубой бухты с помощью MDS по численности (A) и биомассе (Б) (цветами обозначены глубины, м; сходство (similarity), %)

Основной вклад в сходство станций по биомассе на глубинах 50-70 м вносил P. simile (до 90%), который и доминировал на этих глубинах. На глубине 40 м по биомассе содоминировали три вида двустворчатых моллюсков: Gouldia minima, P. simile, Mytilus galloprovincialis.

Для оценки уникальности/типичности современной структуры сообществ в районе Голубой бухты было проведено сравнение с данными ИО РАН по макрозообентосу рыхлых грунтов сходных глубин заповедника «Утриш» (Колючкина, 2017 б), расположенного в 60 км от исследуемых станций. Соотношения биомасс видов макрозообентоса на глубинах как 40 м, так и 50 м в районе Голубой бухты и «Утриша» характеризовались 40%-м сходством (рис. 4.6). На глубинах 40 м в обоих районах доминировал двустворчатый моллюск Gouldia minima, а на 50 м – P. simile. Сходные данные были получены в середине XX века для участка побережья Туапсе – Шепси (съемка февраля – марта 1968 г.), когда на глубинах 40 м были отмечены «локальный» биоценоз G. minima и «региональный» М. galloprovincialis, а на глубине 50 м – также биоценоз с доминированием P. simile (Zaika, 1998). Интересно отметить, что на глубинах 50-110 м в XX веке (1957-1963 гг. – Киселева, 1981; 1980-е гг. – Киселева, 1992) на побережье Северного Кавказа отмечалось доминирование двустворчатого моллюска Modiolula phaseolina, отмеченного в настоящей съемке в виде мелких экземпляров, численность которых не превышала



#### РИС. 4.6.

Ординация проб на разрезах в районе Голубой бухты и в районе заповедника «Утриш» с помощью MDS по биомассе (цветами обозначены глубины, м; цифрами – районы: 1-Утриш, 2-Голубая бухта)

210 эк $3/m^2$ , а биомасса – 8 г/ $m^2$ . Тогда как по данным на вторую половину XX в. на этих глубинах характерные численности руководящего вида составляли 473 экз/м² (60 м) и 3315 экз/м² (70 м), а биомассы 34 г/м² (60 м) и 148 г/м² (70 м). Таким образом, средняя масса особи в современной съемке была ниже в 5-7 раз. Возможно, наличие мелкоразмерных особей в зимне-весенний период объясняется следствием сравнительно недавнего оседания личинок фазеолины, как это и было описано в более ранних исследованиях (Киселева, Славина, 1972). Известно, что положение верхней границы фазеолинового ила неодинаково в разных районах моря (Киселева, 1981). Однако именно в районе побережья Кавказа этот пояс поднимается до глубин 50 м, хотя ядро биоценоза расположено глубже (около 75-85 м) (Zaika, 1998). Можно предположить, что крайне низкие значения численности и биомассы фазеолины на глубине 70 м и отсутствие этого вида на глубине 60 м в районе Голубой бухты в настоящей съемке может быть вызвано расположением разреза напротив реки Ашамба, являющейся сезонным и паводковым водотоком, поскольку известно, что «выделение обычно четко выдерживающихся фаунистических зон (например, мидиевого и фазеолинового биоценозов) во всех предустьевых районах было весьма затруднительным и предположительным» (Барковская, 1961, с. 144). С другой стороны, низкие показатели для фазеолины могут быть обусловлены и случайными причинами (вследствие мозаичного расположения сообщества вне «ядра» биоценоза). Для проверки предположения необходимо проведение повторной съемки в исследуемом районе, а для выяснения масштабов данного явления и сравнения с районом, не подверженным влиянию стока рек, для выявления современного положения верхней границы пояса фазеолины – расширенного исследования (например, в районе заповедника «Утриш» или пос. Шепси) глубин 60-80 м.

## Результаты исследований на разрезе Инал 2017 г. (лето)

В рамках ежегодного мониторинга в июне 2017 г. была проведена оценка состояния макрозообентоса глубин 10-70 м на стандартном разрезе в районе бухты Инал (пробы, собранные в районе пос. Дивноморское и Шепси, находятся на стадии обработки). Было отмечено 58 видов макрозообентоса, 12-28 видов на станцию. Минимальное значение было отмечено на глубине 10 м, а максимальное – на глубине 30 м. Ожидаемое число видов (Chao2) составило  $78\pm12$  (рис. 4.7 A). Основной вклад в видовое разнообразие вносили двустворчатые моллюски и полихеты (66-82%) (рис. 4.7 Б).

Наибольшая численность макрозообентоса была отмечена на глубине 10 м, наименьшая — на глубине 25 м (рис. 4.8 А). Основной вклад в численность на глубинах 15-30 м вносили двустворчатые моллюски, на глубине 40-70 м — полихеты. Наибольшая биомасса была отмечена на глубинах 15-20 м (рис. 4.8 Б). С увеличением глубины биомасса снижалась. Двустворчатые моллюски составляли 90.4-99.7% биомассы на станциях (рис. 4.8 Б).

ГЛАВА 4

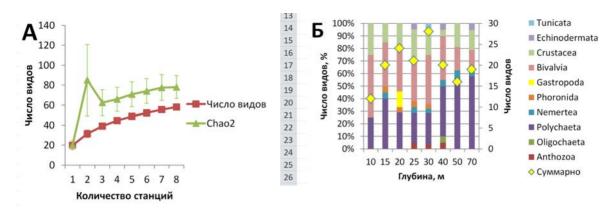


РИС. 4.7.

Кривые накопленного числа видов (число видов) и ожидаемого числа видов (Chao2) макрозообентоса (A) и соотношение числа видов макрозообентоса на разных глубинах (Б) в бухте Инал в июне 2017 г.

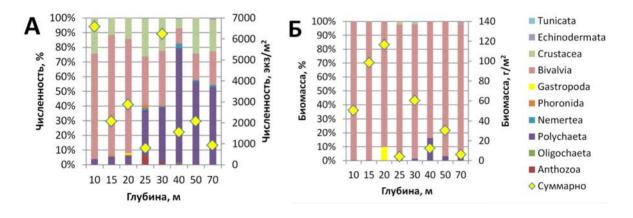


РИС. 4.8.

Суммарная численность и доля основных групп в общей численности макрозообентоса (A) и биомасса и доля основных групп в общей биомассе макрозообентоса (Б) в бухте Инал в июне 2017 г.

На глубинах 15-20 м доминирующими формами по биомассе и численности являлись двустворчатые моллюски Chamelea gallina и Anadara kagoshimensis. На глубине 30 м содоминировали двустворчатые моллюски Gouldia minima и Pitar rudis. На глубине 40 м по биомассе доминировали двустворчатые моллюски A. kagoshimensis и Parvicardium simile, а по численности – полихеты Aricidea claudiae.

Структура макрозообентоса, выявленная в 2017 г. на исследованных глубинах, в целом не отличалась от наблюдаемой на протяжении предыдущих 10 лет (Колючкина и др., 2017 а, 2017 б, 2018): основные доминанты и вертикальная структура не изменились.

Результаты исследования гидрологической структуры вод в районах стандартных макрозообентосных разрезов

Максимальная температура была зафиксирована на станции 47 на глубине 1.0 м и составила 27.2 °C, минимальная – на станции 19 на глубине – 65.8 м, составила 7.2 °C.

Максимальная соленость была зафиксирована на станции 19 на глубине 75.4 м и составила 18.7 ‰, минимальная – на станции 9, в приповерхностном горизонте, составила 15.5 ‰.

Максимальная плотность была зафиксирована на станции 19 на глубине 75.4 м и составила 1014.9 кг/м $^3$ , минимальная – на станции 16, составила 1008.7 кг/м $^3$ .

В районе заповедника «Утриш» значения температуры на поверхности превышали 25 °C, с удалением от берега и до конца разреза (6 км) величина температуры находилась в пределах 24–25 °C; на глубине 14-15 м расположен сезонный слой скачка, значения температуры в этом слое падают с 22 до 12 °C (рис. 4.9). Соленость на поверхности у берега превышает 16.6 ‰, на наиболее удаленной станции – менее 16.4 ‰. В сезонном слое скачка соленость возрастает с 17 до 18.2 ‰.

Слой водной массы от горизонта 20 м и до глубин более 70 м находится под влиянием Основного черноморского течения. Заметен характерный наклон изолиний температуры и солености. Изолинии 8 °C и 18,4 и 18.6 % касаются линии дна на глубинах более чем на 10 м глубже, нежели на мористых станциях.

В районе пос. Дивноморское заметно влияние р. Мезыбь, которое прослеживается на протяжении всего разреза и выражается в охлаждении поверхностного горизонта на 2 °C (27 °C в мористой части и 25-26 °C в прибрежной) и распреснении: так, изогалина 18.2 ‰ расположена на глубине 25 м, поверхностный слой в прибрежной части полигона распреснен до 16.6 ‰, а на расстоянии 5 км от берега находится фронт солености, где значения возрастают до 17.4 ‰ (рис. 4.10).

Термохалинная структура вод Черного моря также испытывает влияние пресноводного стока в бухте Инал. На вертикальном разрезе солености, изображенном на рисунке 4.11, видно распреснение береговой зоны до значений 16.4 ‰, а линза более пресных вод залегает на горизонте 5–12 м и имеет соленость 16.6–16.8 ‰ в мористой части разреза, тогда как в приповерхностном горизонте соленость достигает отметки 17.2 ‰. Температурная стратификация водной массы устойчива, инверсий не наблюдается, на поверхности значения достигают 24 °C, у самого уреза – 23 °C. Сезонный слой скачка расположен на глубине 17-20 м. Глубже температура принимает значения 13-14 °C, соленость – 18 ‰.

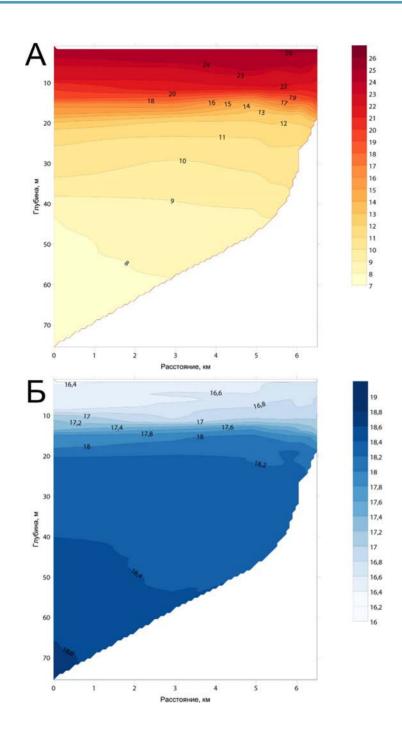


РИС. 4.9.

Вертикальные разрезы температуры (°C) (A) и солености (psu) (Б) в районе заповедника «Утриш»

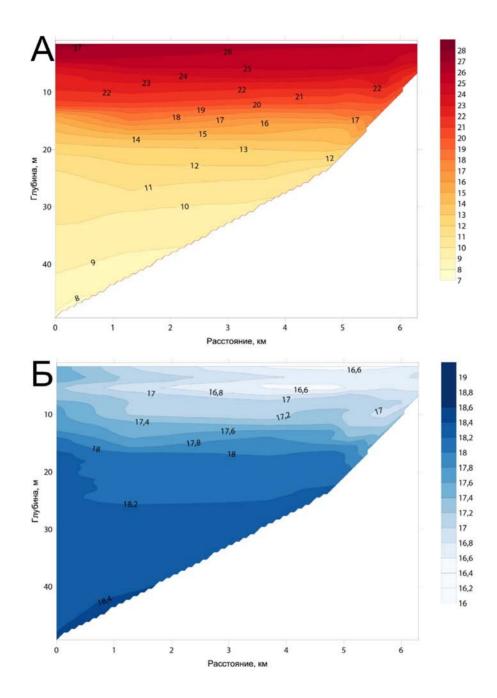


РИС. 4.10.

Вертикальные разрезы температуры (°C) (A) и солености (psu) (Б) в районе пос. Дивноморское

ГЛАВА 4

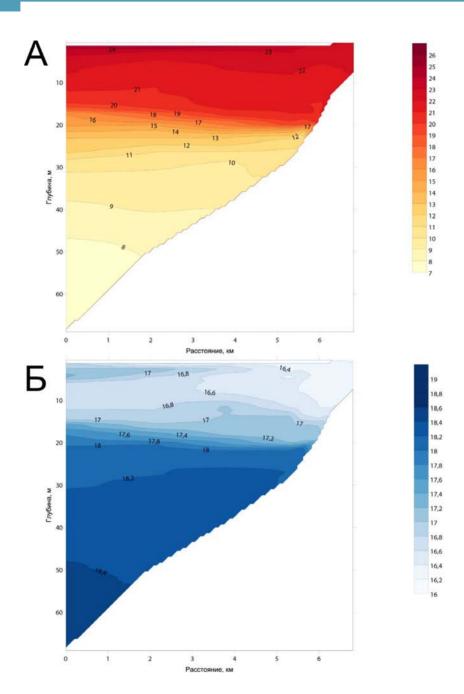


РИС. 4.11.

Вертикальные разрезы температуры (°C) (A) и солености (psu) (Б) в районе бухты Инал

В районе пос. Шепси (самый южный разрез) (рис. 4.12) отмечается более слабое влияние пресного стока р. Шепси, речной сток не формирует фронтальную зону. Водная масса стратифицирована устойчиво по температуре и солености, наблюдается незначительная линза воды с соленостью более 16 % в слое окружающих вод с соленостью 15.8 %. Значения температуры на поверхности достигли отметок 25 °C в прибрежной части разреза и 24 °C – в глубоководной. Равномерный на всем протяжении разреза слой скачка расположен на глубинах 10-15 м.

На рисунках 4.13-4.16 изображены вертикальные профили температуры, солености и плотности на разрезах в бухте Инал, у пос. Шепси, в заповеднике «Утриш» и пос. Дивноморское в начале, середине и в прибрежной части разрезов. В б. Инал и у пос. Дивноморское наиболее мелководные станции расположены в пределах верхнего квазиоднородного слоя водной массы Черного моря, суточный и сезонный слои скачка отсутсвуют, градиенты термохалинных характеристик небольшие. На разрезе у пос. Шепси придонный горизонт захватил сезонный слой скачка, температура понижается с 22 до 18 °С, соленость растет с 16 до 17 ‰, а плотность – с 1010 до 1012 кг/м $^3$  на глубине с 8 до 9 м. Наиболее мелководная станция на разрезе Утриш выполнялась на глубине около 20 м, поэтому на вертикальном профиле термохалинных характеристик присутствует сезонный слой скачка, верхняя граница которого залегает на горизонте около 12 м. Температура понижается с 23 до 13 °C, соленость растет с 17 до 18.5 ‰, плотность – с 1011 до 1013.5 кг/м<sup>3</sup>. На глубоководных станциях разрезов Инал и Шепси в приповерхностных слоя расположены линзы более соленых относительно выше и ниже расположенных вод. Вертикальные разрезы солености, изображенные на рисунках 4.13 и 4.14, позволяют предположить, что такие линзы являются следствием сложного взаимодействия поступающих с берега пресных речных и соленых морских вод вблизи устьев рек, расположенных на берегу у соответствующих разрезов.

Данные по температуре придонной воды в районе бух. Инал, полученные в ходе настоящего исследования, были использованы для анализа в работе, посвященной изучению роли абиотических факторов в вертикальном распределении макрозообентоса (Колючкина и др., 2018). Было показано, что температура придонной воды является основным фактором, определяющим смену видового состава макрозообентоса на глубинах 40-50 м.

## Результаты исследования гранулометрического состава и ОВП донных осадков

Грунт на глубинах 10–30 м преимущественно представлял собой заиленный мелкий (0,1-0,25 мм) песок (рис. 4.17 A-B). На глубинах 40–70 м он состоял из ила с раковинами митилид, доминирующей фракцией донных осадков был пелит, за исключением пос. Дивноморское, где до 50 м доминировал алеврит (рис. 4.17 B). Уровень заиления (содержание алевропелита) достоверно возрастал с глубиной (коэффициент корреляции Спирмена R=0.72). Если на станциях 10–25 м общее содержание илистых фракций не

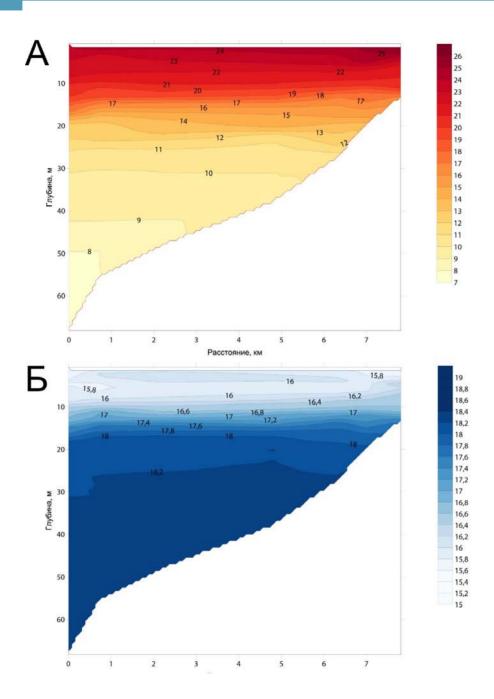


РИС. 4.12.

Вертикальные разрезы температуры (°C) (A) и солености (psu) (Б) в районе пос. Шепси

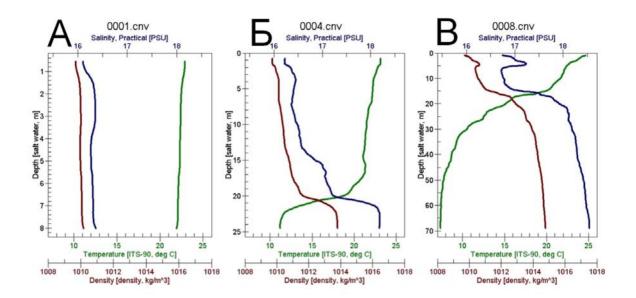


РИС. 4.13.

Вертикальные профили температуры, солености и плотности на глубинах 8 м (A), 25 м (Б) и 70 м (В) на разрезе в районе бухты Инал

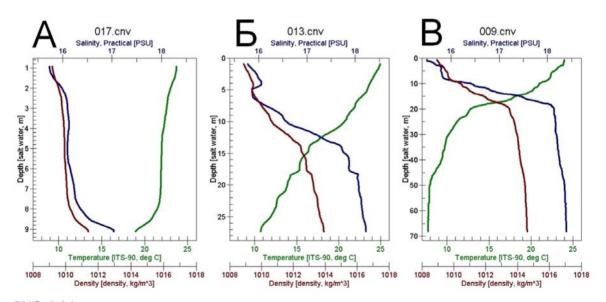


РИС. 4.14.

Вертикальные профили температуры, солености и плотности на глубинах 9 м (A), 25 м (Б) и 70 м (В) на разрезе в районе пос. Шепси

ГЛАВА 4

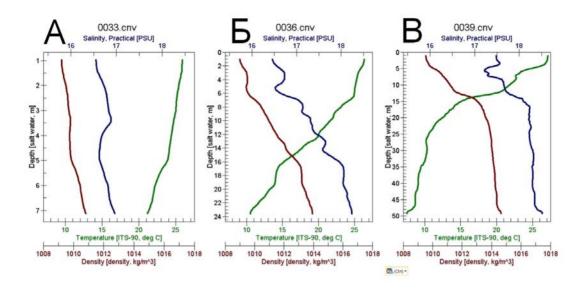


РИС. 4.15.

Вертикальные профили температуры, солености и плотности на глубинах 7 м (А), 24 м (Б) и 50 м (В) на разрезе в районе пос. Дивноморское

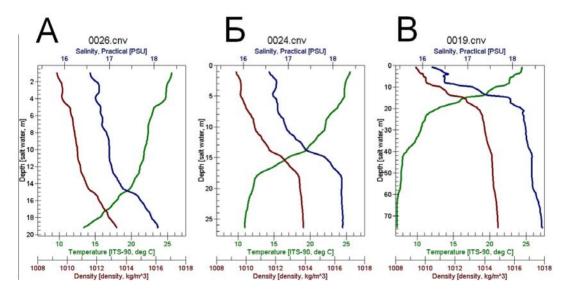


РИС. 4.16.

Вертикальные профили температуры, солености и плотности на глубинах 20 м (А), 25 м (Б) и 70 м (В) на разрезе в районе заповедника «Утриш»

превышало 60%, из них пелитовых – 20%, то на станциях 40-70 м содержание ила было более 90%, из них пелита 15-86% (в зависимости от района исследования). В районе пос. Дивноморское на глубинах 30-50 м доминировали алевритовые илы, а в Шепси и Инале – пелитовые. В районе пос. Дивноморское содержание ракуши не превышало 5%, в Инале и Шепси – достигало 30% и не зависело от глубины исследования.

Таким образом, принципиальная смена типа осадка происходила на глубине 30-40 м с заиленного песка на мелководье на заиленную ракушь на глубинных станциях. Такая ситуация, по всей видимости, является типичной для современного состояния грунтов северо-восточного побережья Кавказа, поскольку в широкомасштабной съемке начала 2000-х гг. (Джубга-Сочи) было отмечено, что «в составе донных отложений до глубины 20-25 м преобладают пески с включениями целой и битой ракуши» (Федоров и др., 2009, с. 136).

Настоящие результаты расходятся с полученными для бух. Инал тремя годами ранее. Так, в 2014 г. на 20-30 м (Колючкина и др., 2017б) суммарное содержание илистых фракций достигало 70%. Возможно, это было связано с локальным заилением донных осадков в 2014 г., когда пробы были собраны после сильного шторма (Колючкина и др., 2017б). В районе пос. Дивноморское как по данным 2001 г. (Чикина, 2009), так и по данным 2014 г. (Колючкина и др., 2017б), так и в настоящем исследовании повышенное содержание ила отмечалось уже для глубин 25 м. Однако, если в 2014 г. в составе ила преобладал пелит, то в 2017 г. в составе илистых отложений преобладала алевритовая фракция, что является характерным для донных осадков этих глубин Черного моря (Барковская, 1961; Федоров и др., 2009). Таким образом, можно предположить, что заиление песков пелитов в разных районах побережья в 2014 г. было связано именно со штормовой погодой. В районе Шепси соотношение гранулометрических фракций в 2014 и 2017 гг. было сходным.

ОВП поровой воды донных осадков на всех станциях был положительным. В поверхностном и верхнем сантиметровом слое осадков на глубинах 10-70 м на трех разрезах (Инал, Дивноморское, Шепси) не наблюдалось достоверных различий (уровень достоверности р=0.569-0.651, рис. 4.17 Г-Е). Здесь значения ОВП составляли 250-450 мВ. В нижнем 5-сантиметровом слое осадка ОВП достоверно отличался для станций разных глубин (уровень достоверности р=0.016), но был сходным в разных районах исследования, что свидетельствует о сравнительно однообразном распределении ОВП в донных осадках в удаленных друг от друга районах побережья. Во всех исследованных районах на глубинах 30 м и более были зарегистрированы значения ОВП менее 100 мВ в нижнем 5-сантиметровом слое и более 250 мВ в верхнем сантиметровом слое осадка. Такого скачка практически не отмечалось на станциях глубин 10-25 м. Наличие скачка между поверхностным слоем и более глубокими свидетельствует о более низком содержании кислорода в этих слоях (Розанов, 1988). Кроме того, значения ОВП в глубоком слое осадка показали отрицательную корреляцию с содержанием в грунте илистых фракций независимо от их размерной структуры (коэффициент корреляции Спирмена R=-0.71).

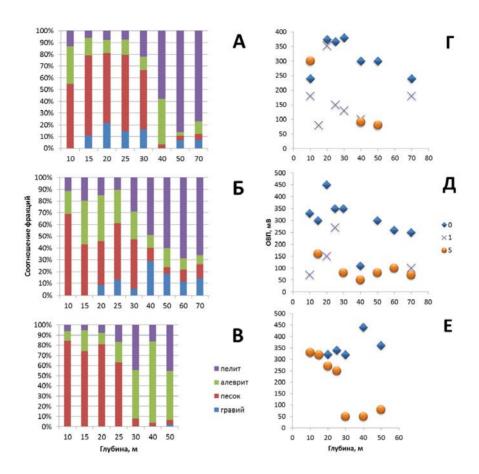


РИС. 4.17.

Гранулометрический состав (A-B) и окислительно-восстановительный потенциал поровой воды донных осадков (Г-E) в районе бух. Инал (A,Г), пос. Шепси (Б,Д) и пос. Дивноморское (B,E) летом 2017 г.

Характер донных осадков является одним из факторов, определяющих состав населяющей их фауны. Так, отличия в структуре сообществ глубин 10-15 и 20-30 м на северо-восточном побережье Черного моря определялись преимущественно соотношением илистых и песчанистых фракций грунта (Колючкина и др., 2018). Здесь на глубинах 10-15 м и 20-30 м была отмечена разница не в составе видов, а в структуре доминирования внутри единого комплекса видов в пределах семейства Veneridae (Bivalvia) как в ходе настоящей работы, так и по данным прошлых лет (Колючкина и др., 2018). Так, на глубинах 10-15 м доминировал псаммофил *Chamelea gallina*. На глубинах 20-30 м доминантами являлись *Pitar rudis*, считающийся пелофильным видом, и *Gouldia minima* – сравнительно индифферентный к заилению моллюск (Мордухай-Болтовской, 1968-1972).

Однако в литературе отсутствуют данные, касающиеся причин различий отношения этих видов к уровню заиления грунта. Предположительно они связаны с отношением к содержанию кислорода в придонной и поровой воде – среде обитания этих зарывающихся видов, – которое при повышенном содержании ила и органического вещества может снижаться. В пользу этой гипотезы свидетельствует наличие скачка ОВП в донных осадках глубин 30 м, отмеченное в настоящей и предыдущих работах (Колючкина и др., 2017б). Однако, поскольку прямых измерений содержания кислорода в поровых водах и отношения вышеуказанных видов к нему не проводилось, данная гипотеза пока остается непроверенной. Кроме того, в определении степени пелофильности вида могут играть роль и особенности фильтрующего аппарата моллюсков, которые могут отличаться у этих видов. Настоящие предположения требуют дальнейших экспериментальных исследований.

В целом в настоящем исследовании не было отмечено повышенного заиления донных осадков глубин 20-30 м по сравнению с более мелководными станциями. Возможно, это свидетельствует о снижении заиления грунтов на исследуемых разрезах. Сходство вертикальной структуры ОВП в грунте в обоих диапазонах глубин указывает на сходный уровень содержания органического вещества в донных осадках этих глубин.

# Результаты исследования «пояса ильной мидии» на глубине 30-50 м (по траловым данным)

В траловых сборах при визуальном осмотре были отмечены Hydrozoa, Actiniaria, Oligochaeta, Nemertini, Crustacea (Anisopoda, Cumacea, Amphipoda), Mollusca (Gastropoda, Bivalvia), Tunicata, Decapoda, а также полихеты сем. Serpulidae (Spirobranchus triqueter).

Доминирующей группой по биомассе были Tunicata и Bivalvia. На глубинах 30 м доминирующими видами моллюсков были  $Pitar\ rudis\ u\ Gouldia\ minima$ , а на 40-50 м –  $Parvicardium\ simile$ . Обычный доминант пояса ильной мидии –  $Mytilus\ galloprovincialis$ , отмечавшийся в сборах XX в., был представлен ювенильными особями. Наибольшее число мидий было отмечено в районе пос. Дивноморское на глубине 40 м (табл. 4.1).

## Результаты исследований распространения нового вида-вселенца красной водоросли Bonnemaisonia hamifera

Как и ранее только талломы тетраспорофитной стадии развития *B. hamifera* были обнаружены во всех сборах (рис. 4.18). На глубинах более 7 м эта багрянка образует невысокий ковер с покрытием до 100% чаще всего красно-бурого цвета высотой 1-2 см. Таллом этой багрянки легко фрагментируется и может расти неприкрепленно, что способствует быстрому распространению. Осенью (к декабрю) образуются тетраспорангии с темноокрашенными тетраспорами (возможно аутоспорами).

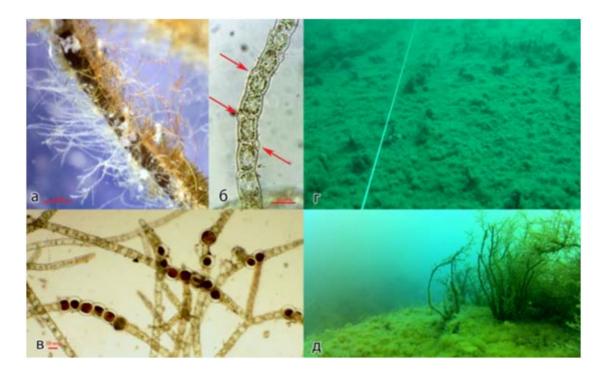
В июле 2016 г. тетраспорофиты *В. hamifera* были обнаружены в массе у берегов Северокавказского побережья в районе ЮО ИО РАН (Голубая бухта), на акватории заповед-

Район, глубина	Дивноморское	Инал			Шепси	
Вид	40 M	30 M	40 M	50 м	30 м	50 M
	Actinar		4	J	<b>9</b>	<u> </u>
Actinothoe clavata	+					
	Polychae	eta				
Spirobranchus triqueter	+					+
- <b></b>	Gastropo	oda				· · · ·
Clathrus annulatus	+					
Calyptraea chinensis	+	+	+	+	+	+
Cyclope neritea	+				+	
Rapana venosa	+	++	+			+
Trophonopsis breviatus	+		+	+		
Tritia reticulata	+		+		+	
	Bivalvi	a				
Acanthocardia paucicostata	+		+			
Abra alba	+			+		
Parvicardium simile	++		++	+		++
Chamelea gallina		+			+	
Anadara kagoshimensis	+	+	+		+	
Gouldia minima	+	+	+		++	
Mytilus galloprovincialis	+	+	+			+
Mytilaster lineatus		+				
Modiolula phaseolina	+		+	+		
Pitar rudis	+	++	+		++	
Spisula subtruncata	+	+	+			
-	Crustac	ea				
Diogenes pugilator		+	+			
Balanus improvisus	+	+			+	
• —	Echinoder	mata				
Amphiura stepanovi				+		
Stereoderma kirchsbergi	+					
•	Tunicat	ta				
Molgula euprocta		+			+	
Ascidiella aspersa	+		+			
Eugyra adriatica	+					

<sup>+ -</sup> вид отмечен, ++ - вид доминирует

ника «Утриш», в Геленджикской бухте, в Керченском проливе. В Таманском заливе и в бухте Инал в июле-декабре 2016 г. этот вид обнаружен не был.

В апреле 2017 г. прикрепленные и неприкрепленные талломы встречались в Голубой бухте как в выбросах, так и во время тралений на глубине от 10 до 30 м в неприкрепленном виде и в обрастаниях крупной ракуши. В июле 2017 г. талломы В. hamifera присутствовали в выбросах в Голубой бухте, в тралах в бухте Инал (30-40 м), в тралах на акватории заповедника «Утриш» (30-40 м), в районе пос. Джанхот (рис. 4.19). В конце июля обследование биотопа скал заповедника «Утриш» и прилегающих акваторий показало, что талломы тетраспорофитной стадии В. hamifera встречаются в диапазоне глубин от 0.5 м до границы скал (20 м и более). В мелководной части – преимущественно в качестве эпифита на различных видах водорослей, а глубже 8 м – как эпифит и эпилит. При этом проективное покрытие дна талломами этого вида может достигать 100%. В Керченском проливе в 2017 г. В. hamifera не встречен. В Таманском заливе и на побережье Азовского моря (Ясенская коса, Кучугуры) обнаружить его пока не удалось.



### РИС. 4.18.

Тетраспорофитная стадия *Bonnemaisonia hamifera* Черного моря: а – внешний вид в обрастании *Cladostephus spongiosus*; б – однорядная нить с бесцветными железистыми клетками (указаны стрелками); в – таллом с тетраспорангиями, заполненными тетраспорами; г,д – участки дна, покрытые *B. hamifera* 13-15 м глубины

Состав видов нативной флоры макрофитов Черного моря, на которых были достоверно обнаружены талломы *B. hamifera* в разных районах за весь период исследований, представлен в работе (Симакова, Смирнов, 2017). В основном это доминанты основных горизонтов литорали. И если мелководная часть фитали до глубин 5-8 м почти не занята вселенцем, то глубже его талломы формируют почти непрерывный покров с высоким покрытием, увеличивающимся с глубиной (рис. 4.18 г, д).



#### РИС. 4.19.

Распространение нового вида-вселенца красной водоросли *Bonnemaisonia hamifera* в Азово-Черноморском регионе по данным исследований ИО РАН 2016-2017 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 4

- *I. Барковская М.Г.* Закономерности распределения донных осадков на шельфе советских берегов Черного моря // Труды Инст. океанол. АН СССР. 1961. Т. 53. С. 123-148.
- 2. Виноградов М.Е., Сапожников В.В., Шушкина Э.А. Экосистема Черного моря. Ред. М.Е. Виноградов. М.: Наука, 1992. 111 с.
- 3. Зацепин А.Г., Голенко Н.Н., Корж А.О., Кременецкий В.В., Пака В.Т. и др. Влияние динамики течений на гидрофизическую структуру вод и вертикальный обмен в деятельном слое Черного моря // Океанология. 2007. Т. 47.  $\mathbb{N}^{\circ}$  3. С. 327-339.
- 4. Зенкевич Л.А. Моря СССР их фауна и флора. М.: Учпедгиз, 1956. 424 с.
- 5. Зернов С.А. К вопросу об изучении жизни Черного моря // Зап. Имп. Акад. Наук, 1913. Т. 32(1). С. 99.
- 6. Золотарев П.Н., Терентьев А.С. Изменения в сообществах макробентоса Гудаутской устричной банки // Океанология. 2012. Т. 52. № 2. С. 251-257.
- 7. *Киселева М.И., Славина О.Я.* Количественное распределение макробентоса у побережья Кавказа. В сб. Распределение бентоса и биология донных животных в южных морях. Киев: Наукова думка, 1966. С. 55-74.
- 8. *Киселева М.И., Славина О.Я.* Распределение бентоса у побережья Кавказа в районе Туапсе-Шепси // Биология моря. 1972. Вып. 26. С. 125-133.
- 9. Киселева М.И. Бентос рыхлых грунтов Черного моря. Киев: Наукова думка, 1981. 168 с.
- 10. Киселева М.И. Сравнительная характеристика донных сообществ у побережья Кавказа. В сб. Многолетние изменения зообентоса Черного моря. Киев: Наукова думка, 1992. С. 88-94.
- *II. Киселева М.И.* Многощетинковые черви (Polychaeta) Черного и Азовского морей. Апатиты: Кольский научн. центр., 2004. 409 с.
- 12. Кныш В.В., Коротаев Г.К., Моисеенко В.А., Кубряков А.И., Белокопытов В.Н., Инюшина Н.В. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971-1993 гг. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 3. С. 433-446.
- 13. Колючкина Г.А., Чикина М.В., Бирюкова С.В., Булышева Н.И., Басин А.Б., Любимов И.В., Коваленко Е.П. Долговременные изменения популяции двустворчатого моллюскавселенца Anadara kagoshimensis на северо-восточном побережье Черного моря // ВНИРО. 2018. Т. 171. С. 7-25.
- 14. Колючкина Г.А., Чикина М.В., Басин А.Б., Прохорова Т.Д., Любимов И.В. Таксоцен Bivalvia северо-восточного побережья Черного моря: результаты 16-летнего мониторинга // Труды VI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2017): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС». 2017а. С. 410-413.

- 15. Колючкина Г.А., Семин В.Л., Басин А.Б., Кузнецова А.В., Григоренко К.С., Любимов И.В., Симакова У.В. Современное состояние макрозообентоса рыхлых грунтов заповедника «Утриш» // Наземные и прилегающие морские экосистемы полуострова Абрау: структура, биоразнообразие и охрана. Научные труды. 2017б. Том 4. С. 228-240.
- 16. Кучерук Н.В., Флинт М.В., Максимова О.В., Чикина М.В., Симакова У. В. Современная динамика бентосных сообществ северо-восточного шельфа Черного моря // Котляков В.М., Люри Д.И. (отв. ред.) Изменение природной среды России в XX веке. М.: Изд. Молнет, 2012. С. 274-288.
- 17. Кучерук Н.В., Басин А.Б., Котов А.В., Чикина М.В. Макрозообентос рыхлых грунтов северокавказского побережья Черного моря: многолетняя динамика сообществ. Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 289-298.
- 18. Максимова О.В., Лучина Н.П. Современное состояние макрофитобентоса у побережья Северного Кавказа: реакция фитали на эвтрофикацию Черноморского бассейна // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 297-308.
- 19. Мордухай-Болтовской Ф.Д. Определитель фауны Черного и Азовского морей. Киев: Наукова думка, 1968-1972. 3 Т.
- 20. Набоженко М.В. Современное распределение двустворчатых моллюсков (Mollusca: Bivalvia) северо-восточной части Черного моря // Наука Юга России. 2011. Т. 7(3). С. 79-86.
- 21. Розанов А.Г. Окислительно-восстановительные процессы в морских осадках и методы их исследования. В сб. Химический анализ морских осадков. М.: Наука, 1988. С. 5-44.
- 22. Сверлова Н.В., Сон М.О. Моллюски-интродуценты и их место в городских малакоценозах // Фауна, экология и внутривидовая изменчивость наземных моллюсков. Львов.: Государственный природоведческий музей, 2006. С. 42-59.
- 23. Селифонова Ж.П., Часовников В.К. Экологическое состояние зообентоса прикавказской зоны Черного моря (район Джубга Хоста) // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 10(30). С. 109-118.
- 24. Симакова У.В., Смирнов И.А. Распространение и экология инвазивного вида Bonnemaisonia hamifera Hariot в Черном море // Труды VI Международной на-учно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2017): [сборник]. Тверь: изд. ООО «ПолиПРЕСС», 2017. С. 419-422.
- 25. Старк И.Н. Сырьевая база и распределение устриц на Гудаутской банке // Труды АзЧерНИРО. 1950. Т. 14. С. 247-261.
- 26. Федоров А.С., Миронюк С.Г., Шельтинг С.К. Рельеф и проявления современных литодинамических процессов по трассе морского газопровода «Джубга-Лазаревское-Сочи» // Труды Международной конференции в честь столетия со дня рождения

- профессора Владимира Витальевича Лонгинова «Литодинамика донной контактной зоны океана». М. 14-17 сентября 2009 г. С. 135-137.
- 27. Чикина М.В. Макрозообентос рыхлых грунтов Северо-Кавказского побережья Черного моря: пространственная структура и многолетняя динамика. Дисс. канд. биол. наук. М. 2009. 117 с.
- 28. Чухчин В.Д. Рапана (Rapana bezoar L.) на Гудаутской устричной банке // Тр. Севастоп. Биол. Станции. 1961. Т. 14. С. 178-187.
- 29. Шадрин Н. В. Дальние вселенцы в Черном и Азовском морях: экологические взрывы, их причины, последствия, прогноз // Экология моря. 2000. Вып. 51. С. 72-78.
- 30. *Abdi H.* Holm's sequential Bonferroni procedure // Encyclopedia of research design. 2010. V. 1(8). P. 1-8.
- 31. Bellan-Santini D., Diviacco G., Krapp-Schickel G., Ruffo S. The Amphipoda of the Mediterranean. Part 2. Gammaridea (Haustoriidae to Lysianassidae) // Mémoires de l'Institut océanographique, Monaco, 13. / Ed. Ruffo S. Institut Océanographique: Monaco. Multiprint Monaco. 1989. 576 p.
- 32. Bellan-Santini D., Karaman G., Krapp-Schickel G., Ledoyer M., Myers A., Ruffo S., Schiecke U. The Amphipoda of the Mediterranean. Part 1: Gammaridae (Acanthonotozomatidae to Gammaridae) // Memories de l'Institut Oceanographique. №13. Ed. Ruffo S. Institut Océanographique: Monaco. Multiprint Monaco. 1982. 364 p.
- 33. Bologa A.S., Bodeanu N., Petran A., Tiganus V., Zaitsev Y.P. Major modifications of the Black Sea benthic and planktonic biota in the last three decades. // Bulletin de l'Institut Océanographique. 1995. V. 1. P. 85-110.
- 34. Boudouresque C.F., Verlaque M. Biological pollution in the Mediterranean Sea: invasive versus introduced macrophytes // Marine pollution bulletin. 2002. V. 44. No. 1. P. 32-38.
- 35. Chikina M.V., Kolyuchkina G.A., Prohorova T.D. The Role of the Invasive Bivalve Anadara kagoshimensis in Contemporary State of the Northeastern Black Sea Coastal Biocenosis // Abstracts Volume from 49th European Marine Biology Symposium, September 8–12, 2014 St. Petersburg, Russia, p. 66-67.
- 36. Clarke K.R., Gorley R.N. PRIMER v6: User Manual // Tutorial. PRIMER-E, Plymouth, 2006. 192 pp.
- 37. Clarke K.R., Warwick R.M. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation // 2nd edition. PRIMER-E. Plymouth. 2001. 172 pp.
- 38. De Villèle X., Verlaque M. Changes and degradation in a Posidonia oceanica bed invaded by the introduced tropical alga Caulerpa taxifolia in the north western Mediterranean // Botanica Marina. 1995. V. 38. №. 1-6. P. 79-88.
- 39. Dumitrache C., Abaza V. The present state of benthic communities in the Romanian coastal waters // Recherches Marines. INCDM. Constanta. 2004. V. 35. P. 61-75.

- 40. Gomoiu M.T., Petran A. Dynamics of settlement of bivalve Mya arenaria on the Romanian shore of the Black Sea // Cercetari mairne -Recherches marines, IRCM-Constanta. 1973. V. 5/6. P.263-289.
- 41. Grintsov V., Sezgin M. Manual for identification of Amphipoda from the Black Sea // Digit print. 2011. 151 p.
- 42. Maximova O.V., Moruchkova N.A. Long-term anthropogenic transformation and contemporary state of the North Caucasian macrophytobenthos (Black Sea) // Oceanology. 2005. V. 45. № SUPPL. I.
- 43. Pearson T.H., Rosenberg R. Feast and famine: structuring factors in marine benthic communities: // Organization of Communities: Past and Present. J. H. R.Gee & P. S. Giller (Eds.). Blackwell Science. Oxford. 1987. P.373–95.
- 44. Piazzi L., Balata D. Invasion of alien macroalgae in different Mediterranean habitats // Biological Invasions. 2009. V. 11. №. 2. P. 193-204.
- 45. Zaika V. E. Spatial structure of the Black Sea benthic communities: influence of pelagic processes /Ivanov LI, Ogus T.(eds.) // Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea. 1998. V. I. P. 293-299.
- 46. Zaitsev Yu., Ozturk B. Exotic species in the Aegean, Marmara, Black, Azov and Caspian seas. Published by Turkish Marine Research foundation. Istanbul. Turkey. 2001. 267 pp.

# **АЗОВСКИЕ ВОДЫ** В ЧЕРНОМ МОРЕ

Завьялов П.О.<sup> $^{1}$ </sup>, Ижицкий А.С. $^{^{1}}$ , Гончаренко И.В. $^{^{1}}$ , Хлебопашев П.В. $^{^{1}}$ , Ижицкая Е.С. $^{^{1}}$ , Коновалов Б.В. $^{^{1}}$ , Пелевин В.В. $^{^{1}}$ , Осокина В.А. $^{^{1}}$ 

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью настоящего этапа экспедиции «Черное море - 2017» являются исследования процессов распространения в Черном море поступающих через Керченский пролив вод Азовского моря и их влияния на гидрофизические условия и состояние экосистемы шельфовой зоны Крымского полуострова.

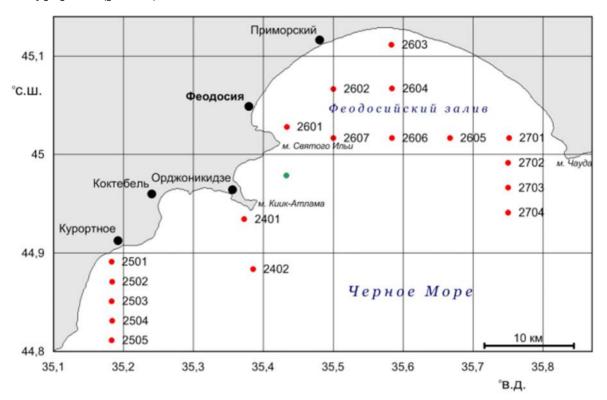
На этапе экспедиции 2017 года решались следующие основные задачи:

- Исследование влияния распространения вод Азовского моря на гидрофизическую, гидрохимическую и гидрооптическую структуру прибрежных районов Феодосийского залива.
- 2. Исследование режима биогенных элементов и параметров карбонатной системы морских вод Феодосийского залива и прилегающего шельфа Черного моря.
- 4. Исследование мелкомасштабной и синоптической изменчивости термохалинных характеристик и морской циркуляции в районах распространения азовоморских вод.
- 5. Изучение особенностей распределения полей концентраций метана в зоне взаимодействия вод Черного и Азовского морей.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН E-mail: peter@ocean.ru

ГЛАВА 5

Работы выполнялись в Феодосийском заливе и прилегающих к нему прибрежных районах шельфа юго-восточной части Крымского полуострова от мыса Чауда до поселка Курортное (рис. 5.1).



#### РИС. 5.1.

Схема расположения гидрологических (красные точки) и заякоренной (зеленая точка) станций в районе исследований

Измерения были организованы в форме четырех однодневных выходов (24, 25, 26 и 27 мая) на судне МНИС «Ашамба». В общей сложности за период работ было выполнено 8 гидрологических станций (рис. 5.1).

# МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

#### Гидрофизические исследования

Температура и электропроводность воды измерялись на ходу судна в приповерхностном слое (глубина і м) с помощью проточной зондирующей системы, состоящей

из подающего забортную воду центробежного насоса производительностью около і л/с и уложенного в специальный контейнер емкостью 30 литров на палубе CTD зонда YSI 6600 (рис. 5.2). Частота опроса датчиков CTD-зонда составляла і Гц.





РИС. 5.2.

Проточная система с использованием CTD-зонда YSI 6600 (слева) и зонд Cat 19 plus для вертикального зондирования (справа)

Вертикальные распределения величин температуры, электропроводности и флюоресценции хлорофилла измерялись на станциях посредством СТD-зондирования с использованием зонда SBE 19 plus, обеспечивающего дискретность измерений 4 Гц.

Скорость и направление морских течений в придонном слое регистрировались на заякоренной станции, оснащенной измерителем системы MAT Logger. Интервал между измерениями составлял 10 минут при 1-минутном периоде осреднения с частотой 16 Гц. Колебания значений температуры воды (дискретность 2 минуты) фиксировались на шести горизонтах с помощью цепи термисторов, установленных на заякоренной станции. Общий период измерений на заякоренной станции составил 4 суток с 24 мая по 28 мая.

Измерения сопуствующих метеорологических параметров, в том числе колебаний температуры воздуха, атмосферного давления, скорости и направления ветра, проводились с помощью автономной портативной метеорологической станции GILL GMX 500, установленной на борту судна. Частота проведения измерений на метеостанции составляла і Гц.

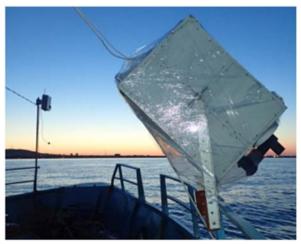
Измерение скорости и направления морских течений на разрезах между станциями проводилось по ходу движения судна при помощи акустического доплеровского измерителя течений RDI WH Sentinel 600 кГц. Измеритель в комплекте с компасом Hemisphere V102 был смонтирован на штанге и размещен на глубине 1.5 м под поверхностью воды.

#### Методика гидрооптических измерений

На 18 станциях в поверхностном слое определены концентрации общей взвеси, ее минеральной и органической составляющей и Chl-а. Дополнительно на станциях измерена относительная прозрачность воды (максимальная глубина видимости диска Секки). Пробы воды объемом 5 л отбирались с поверхности ведром. Взвесь отфильтровывалась под давлением (при перепаде 0,2 атм) на стекловолокнистые фильтры Whatman GF/F диаметром 47 мм. Фильтры высушивались в присутствии силикагеля и хранились в морозильнике. Анализ содержания взвеси проводился в лабораторных условиях. Концентрация Chl-а определялась по стандартной спектрофотометрической методике (ГОСТ, 1990). Методика определения суммарной концентрации взвеси и ее компонентов описана в работе (Коновалов и др., 2014).

В ходе экспедиции в Феодосийском заливе Черного моря в мае 2017 года проводились измерения лазерным ультрафиолетовым флуоресцентным лидаром УФЛ-9 (Palmer et al., 2013; Pelevin et al., 2017; Завьялов и др., 2014) на станциях и на ходу судна (рис. 5.3).





#### РИС. 5.3.

Монтаж измерительного оборудования на судно у причала (слева), работа лидара и спектрофотометра по ходу движения судна (справа)

Результаты измерений автоматически привязывались к координатам места с помощью GPS. На станциях снимался спектр флуоресценции и обратного рассеяния лазерного импульса 355 нм в спектральных каналах 355, 385, 404, 424, 440, 460, 497, 532, 620, 651, 685 нм. На ходу судна проводилось непрерывное зондирование с частотой 2 Гц приповерхностного слоя вод с одновременной регистрацией сигналов при 355, 404, 440, 685 нм, что позволяло измерять: по сигналам флуоресценции при 685 и 440 нм – в относительных единицах концентрации хлорофилла и органического вещества; по сигналу упругого рассеяния при 355 нм – концентрацию взвеси. При этом проводилось нормирование всех измерительных каналов на сигнал комбинационного рассеяния лазерного излучения водой при 404 нм. Толщина зондируемого слоя в районе работ составляла до 5 м.

Для уменьшения влияния случайных ошибок на итоговый результат данные измерений, полученные на станциях наблюдений, сглаживались при усреднении 10-50 сигналов. При обработке данных, полученных на разрезах на ходу судна, проводилось сглаживание рядов данных скользящим средним с шириной окна в 3 отсчета.

По окончании экспедиции была проведена калибровка показаний лидара по данным анализа отобранных на 18 станциях проб воды на Chl-а, взвешенное органическое вещество (ВОВ) и минеральную взвесь (Коновалов и др., 2014). На основании данных калибровок построены карты распределения Chl-а, ВОВ и минеральной взвеси на полигоне работ в абсолютных единицах.

#### Методы гидрохимических исследований

При гидрохимических исследованиях на данном этапе использовались стандартные методы отбора и лабораторного анализа проб морской воды, подробно описанные в Главе 3 настоящей монографии.

#### Методы и средства газометрических исследований

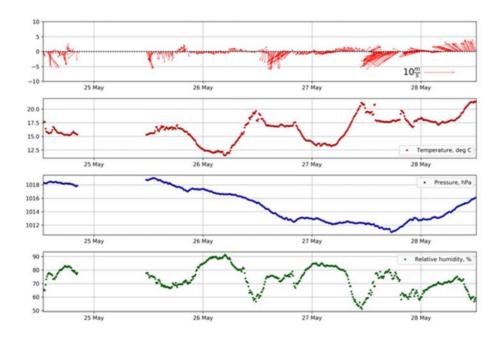
Пробы воды с поверхностного и придонного горизонтов отбирались батометром. Были использованы стеклянные банки с узким горлом (30 мл), предварительно промытые раствором хромовокислого калия, дистиллированной водой и высушенные (Бордовский, Чернякова, 1992). При анализе проб воды применялась методика фазоворавновесной дегазации. Она заключается в следующем: банка заполняется водой с переливом одного объема, чтобы внутри не осталось пузырьков воздуха; газовая фаза формируется вытеснением части жидкости специальным шприцем определенного объема. Банка, закрытая крышкой с резиновой прокладкой, хранится в таком положении, чтобы пузырек газа внутри не касался крышки для исключения возможного газообмена между пробой и атмосферным воздухом.

Определение концентраций метана в пробах воды производилось с помощью газового хроматографа с пламенно-ионизационным детектором ХПМ-2, работающего на генераторе чистого водорода.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### Результаты гидрофизических исследований

Метеорологические условия в первые двое суток периода работ характеризовались относительно малой изменчивостью температуры воздуха и атмосферного давления (рис. 5.4). Величины атмосферного давления достигали в это время максимальных значений 1019,1 гПа. Начиная с 26 мая прослеживался ярко выраженный суточный ход температуры воздуха (амплитуда около  $8^{\circ}$ C), выделялся общий положительный тренд. В то же время атмосферное давление начало снижаться, достигнув минимальных значений 27 мая (1010,8 гПа), после чего наблюдался его постепенный рост до конца периода работ.



#### РИС. 5.4.

Результаты измерения основных метеорологических параметров; данные автономной портативной метеорологической станции, размещенной на борту судна «Ашамба», осреднение по 10-минутным интервалам : а – направление и скорость ветра; б – температура,  ${}^{\rm o}$ С; в – атмосферное давление,  ${}^{\rm r}$ Па;  ${}^{\rm r}$  – относительная влажность,  ${}^{\rm s}$ 

В ходе дневных выходов судна на полигоне наблюдался северный и северо-восточный ветер до 10-11 м/с. Максимальные значения скорости ветра, зафиксированные в период экспедиции, достигали 12,5 м/с. На векторной диаграмме скорости ветра хорошо выделяются периоды нахождения судна в порту (существенно более низкие величины скорости ветра в ночное и вечернее время).

В период проведения работ в Феодосийском заливе и на прилегающих участках шельфа была выявлена изменчивость термохалинных характеристик вод, главным образом обусловленная особенностями водообмена различных частей залива с морем и метеорологической обстановкой. На основе данных измерений строились ежедневные карты распределения поверхностной температуры. Эти карты вместе с данными ежедневных вертикальных СТD-зондирований, а также данными термисторной косы позволяли следить за пространственной и временной изменчивостью трехмерной структуры исследуемых районов.

На рисунке 5.5 представлены вертикальные профили температуры, солености и флюоресценции хлорофилла на станциях полигона. 24 мая на разрезе от мыса Киик-Атлама и 25 мая на разрезе от пос. Курортное наблюдалась двухслойная стратификация вод с термоклином на глубине 15 м. Верхний перемешанный слой характеризовался значениями солености 18.1-18.2 % и температуры 14-15°C, а придонный – 18.4-18.5 % и 8-9 °C соответственно.

На профилях станций в Феодосийском заливе и на разрезе к западу от м. Чауда 26 и 27 мая термоклин был выражен слабо, имело место постепенное понижение значений температуры и повышение величин солености от поверхности ко дну. При этом, значения температуры в целом по профилю были выше зафиксированных ранее в западной части полигона. В то же время значения величин солености на поверхности и в придонной части водной колонны оказались ниже. В особенности это касается станций 2604, 2701 и 2702, где значения солености в поверхностном слое понижались до 17,8 епс. По-видимому, на этих станциях наиболее отчетливо было зафиксировано влияние распространения трансформированных азовоморских вод из-за м. Чауда в центральную часть залива. Тем не менее, степень этого влияния на гидрологическую структуру вод полигона в период работ была достаточно низка даже в сравнении с аналогичными измерениями, например за 2015 г. (Ижицкий, Завьялов, 2017).

На рисунках 5.6 - 5.7 приведены карты поверхностного распределения термохалинных характеристик исследуемого района. Минимальные значения температуры (14  $^{\circ}$ C) были зафиксированы в прибрежной зоне в районе м. Киик-Атлама и м. Ильи. Понижение температуры было обусловлено прибрежным апвеллингом, развитие которого подтвердили данные измерения заякоренной станции. В центральной части Феодосийского залива наблюдались максимальные значения температуры, что, по-видимому, отражает влияние затока трансформированных азовоморских вод на полигон. Это согласуется и с данными вертикального зондирования.

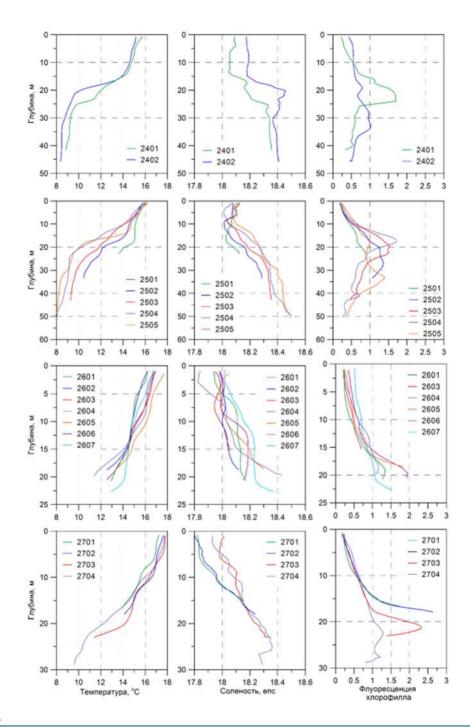


РИС. 5.5.

Вертикальные профили температуры, солености и флюоресценции хлорофилла на станциях полигона

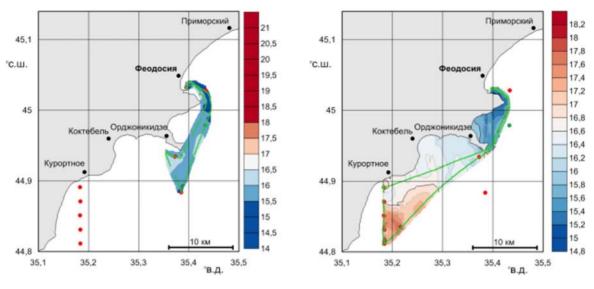


РИС. 5.6.

Распределение температуры вод (°C) в поверхностном слое на участках в западной части полигона 24.05.2017 г. (слева) и 25.05.2017 г. (справа)

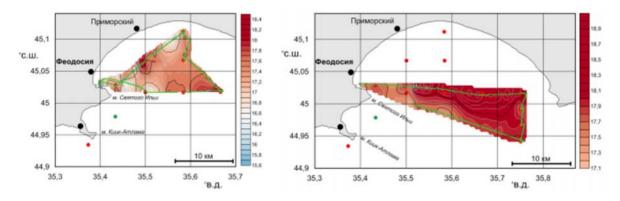


РИС. 5.7.

Распределение температуры вод (°C) в поверхностном слое центральной и восточной частей Феодосийского залива 26.05.2017 г. (слева), а также на разрезе к западу м. Чауда 27.05.2016 г. (справа)

На рисунке 5.8 приведена обобщенная картина распределения температуры в поверхностном слое вод на полигоне. Наблюдаемое поверхностсное распределение термохалинных характеристик свидетельствует об имеющейся, но все же не столь значи-

тельной роли азовоморского стока в формировании структуры вод в заливе в период проведения работ.

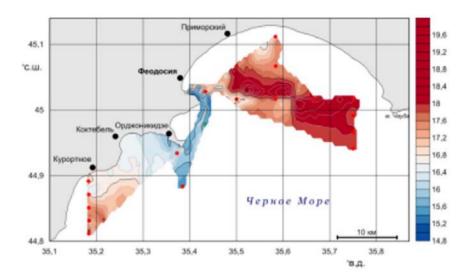


РИС. 5.8.

Обобщенная картина распределения температуры вод (°C) в поверхностном слое Феодосийского залива в период исследований

Для непрерывной регистрации данных об изменчивости термической структуры водной толщи и внутренних волнах в прибрежной зоне была установлена заякоренная станция, оснащенная автономными регистраторами температуры DST centi T фирмы Star-Oddi. Разрешение датчиков температуры составляло 0.032 °C, точность 0.1 °C, диапазон измерений от -1 °C до 40 °C. Термисторы были синхронизированы по времени между собой и вели регистрацию с дискретностью 2 мин. Станция, оснащенная шестью датчиками, непрерывно регистрировала информацию о температурной изменчивости водной толщи в течение практически полных 4 суток (24-28 мая). Характер изменчивости вертикальной термической структуры за весь период наблюдений представлен на рисунке 5.9.

В течение первых двух суток записи на шельфе наблюдалась устойчивая двухслойная структура вод с выраженными волновой изменчивостью значений температуры в термоклине с амплитудой до 5° С и колебаниями нижней границы термоклина в пределах 5 м. В конце вторых суток записи (26 мая) температура всей водной колонны начала понижаться. К концу измерений 28 мая температура толщи вод в охваченном датчиками диапазоне глубин составляла 8,4° С. По-видимому, наблюдаемая картина связана с усилением апвеллинговых течений в данном районе шельфа, которые могли быть

вызваны действием сгонных ветров северных румбов, зафиксированных на метеостанции 26 мая. Вместе с этим характерные для апвеллинга течения северного направления были зафиксированы на заякоренной станции в придонном слое.

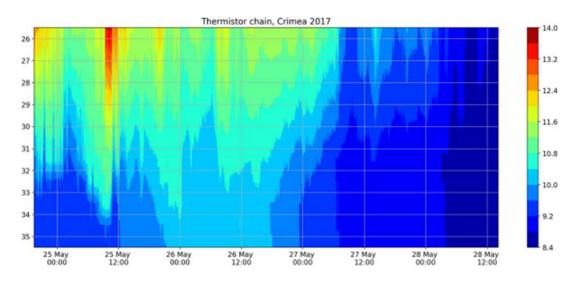
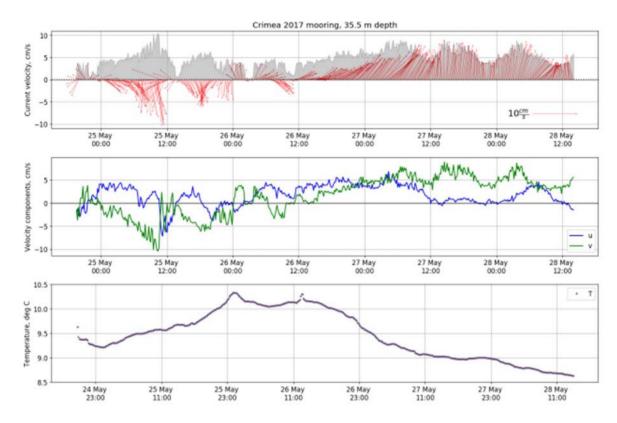


РИС. 5.9.

Изменчивость вертикальной термической структуры (температура, °C) за весь период наблюдений (в виде временной записи термисторной цепи по глубине) на заякоренной станции

В ходе экспедиционных работ были получены данные о характере прибрежной циркуляции вод. Измерения проводились на заякоренной станции, установленной в точке на участке шельфа при выходе из Двуякорной бухты на глубине 35.5 м. На рисунке 5.10 представлена изменчивость скорости и направления течения в придонном слое. В течение первых двух суток наблюдались направленные преимущественно на юг течения, изменчивость скорости которых носила ярко выраженный волновой характер, что хорошо заметно на графике колебаний меридиональной и зональной компонент. К концу вторых суток записи на участке шельфа начало развиваться направленное на север, северо-восток течение, со скоростями 10-15 см/с. Развитие этого течения сопровождалось монотонным падением температуры воды придонного и вышележащих слоев водной колонны. Вместе с данными записи термисторной цепи это указывает на развитие апвеллинговых движений вод на данном участке исследуемого полигона. Согласно полученным данным, апвеллинг начал развиваться под воздействием сгонных северных ветров и продолжался до конца периода записи приборов, что привело к заметному понижению температуры всей водной толщи.



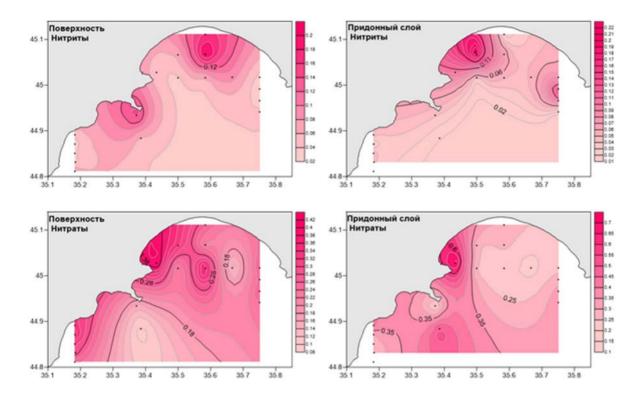
#### РИС. 5.10.

Данные измерений, выполненных на заякоренной станции: векторная диаграмма течений в придонном слое (верхний график), изменчивость меридиональной и зональной компонент морского течения (средний график), график колебаний температуры воды в придонном слое (нижний график)

## Результаты исследований гидрохимической структуры вод

Гидрохимические исследования позволили сделать ряд выводов о характере загрязнения и процессах водообмена Феодосийского залива и прилегающей прибрежной акватории Черного моря. Было установлено, что основным источником поступления загрязняющих веществ исследуемого участка моря является береговой сток г. Феодосия, который, по всей видимости, подвержен существенному антропогенному воздействию. Об этом свидетельствует сходное распределение форм азота (рис. 5.11), концентрации которых возрастают из открытой части моря в направлении залива. Этот рост особенно выражен в придонном слое. Характер распределения биогенных элементов не позволяет с уверенностью говорить о влиянии азовоморской водной массы на акваторию Феодосийской бухты в рассматриваемый период. Невысокие концентрации биогенных

элементов (кроме содержания аммонийного и, частично, нитритного азота) характерны для завершающей стадии развития планктонных сообществ и не превышают ПДК водных объектов, используемых для рыбохозяйственных целей.



#### РИС. 5.11.

Распределения концентраций (мкМ/л) нитритного азота на поверхности и в придонном слое (верхняя панель) и нитратного азота на поверхности и в придонном слое (нижняя панель)

#### Результаты исследования концентраций растворенного метана

Изучение распределения растворенного в воде метана представляет большой интерес при поиске нефтегазовых месторождений на дне акваторий (Шимкус и др., 1998) и оценке парникового эффекта нашей планеты (Бажин, 2000). Кроме того, данные о концентрации метана позволяют косвенно оценить степень загрязнения вод сточными органическими веществами (Федоров и др., 2005) и исследовать биогеохимический круговорот веществ.

В рамках экспедиции в мае 2017 г. одной из целей являлось продолжение исследования характера распределения растворенного метана в районе Феодосийского залива.

Были поставлены следующие задачи:

- I. Отбор проб с поверхностного и придонного горизонтов параллельно с отбором проб на различные гидрохимические показатели в районе Феодосийского залива.
- 2. Лабораторный анализ проб воды и осадков на содержание метана газово-хроматографическим методом.
- 3. Выявление закономерностей распределения растворенного метана с установлением роли возможных факторов, влияющих на содержание CH<sub>4</sub> в исследуемом регионе.
- 4. Сравнение полученных данных с результатами экспедиций прошлых лет.

Величины значений концентраций метана, полученные в период экспедиции в районе Феодосийского залива в 2017 г., в среднем в 15 раз превышают равновесное значение с атмосферным воздухом, что практически полностью совпадает с результатами исследований в мае 2016 г. (рис. 5.12). В прибрежных районах сосредоточено значительное количество органических веществ, образующихся в толще вод вблизи берега и верхнем слое грунта, а также поступающих с материковым стоком. В условиях анаэробного разложения органики, которые создаются в бескислородных микронишах в воде (кишечные тракты зоопланктона, фекальные пеллеты), а также восстановленном осадке на дне, происходит образование биогенного метана.

Концентрация метана в поверхностном слое вод в центральной части Феодосийского залива 26 мая 2017 г. составляла около 14 нмоль/л, в два раза превышая средние значения мая 2016 г. Придонное содержание метана в заливе было в среднем в два раза ниже, чем год назад, и составляет около 30 нмоль/л. Однако, как и в 2016 г., наблюдается рост придонных концентраций  ${\rm CH_4}_4$  с удалением от берега залива и общее превышение придонных значений над поверхностными.

При рассмотрении вертикального распределения метана в толще вод вблизи залива можно отметить рост его концентраций ко дну на станциях с глубинами 30 – 50 м примерно до 80 нмоль/л, наблюдавшийся также в мае 2016 г. В ряде предыдущих прибрежных экспедиций в северо-восточной части Черного моря на горизонтах 30 – 50 м был зафиксирован локальный максимум содержания метана, вероятно, связанный с накоплением в этой области зоопланктона. Таким образом, увеличение содержания метана в придонных водах на станциях с глубиной до 50 м может отражать общие закономерности его распределения в прибрежных водах.

Значения концентраций метана в поверхностном слое вод, полученные в мае 2017 г. на разрезах к юго-западу (мыс Киик-Атлама 24 мая и Карадагский природный заповедник 25 мая) и юго-востоку (мыс Чауда 27 мая) от Феодосийского залива, лежат примерно в одном диапазоне. В придонном слое амплитуда концентраций значительно выше, однако характер распределения газа по разрезам 24 и 25 мая совпадает в поверхностных

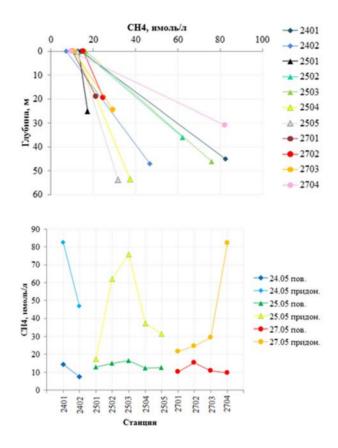


РИС. 5.12.

Содержание метана в поверхностном и придонном слоях вод на станциях разрезов в районе Феодосийского залива 24, 25 и 27 мая 2017 г. (по станциям – вверху, по разрезам – внизу)

и придонных водах. В то же время на разрезе вблизи мыса Чауда количество растворенного метана у дна сильно возрастает с удалением от берега, в отличие от содержания в поверхностном слое, что указывает на различные условия формирования полей концентраций метана на различных горизонтах в этом районе.

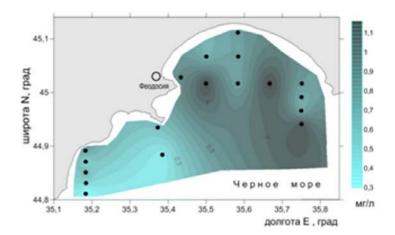
#### Результаты гидрооптических исследований

Диапазоны изменчивости концентраций показателей, приведенных в табл. 5.1, заметно различались в период проведения работ. Наименьшие отклонения от средних значений наблюдались у пигментного индекса (ПИ) фитопланктона (3.2  $\pm$  0.2), что свидетельствует прежде всего об относительном постоянстве возраста его клеток. Наибольшие – у минеральной взвеси (0.74  $\pm$  0.4). В водной массе, поступающей в залив с востока, максимальные концентрации  $C_{_{\text{вмв}}}$  были в 3.5 раза выше по сравнению с ее фоновыми значениями на юго-западе. Несмотря на указанные изменения концентра-

ций минеральной взвеси, которая в основном и определяет мутность воды, относительная прозрачность изменялась не столь значительно, всего в 1.6 раза. В период работы прослеживалось общее постепенное снижение концентраций минеральной и органической взвеси в западном направлении (рис. 5.13). При этом характер этих изменений на качественном уровне хорошо согласуется с изменениями относительной прозрачности. Это выглядит особенно убедительно на рис. 5.14-5.15, на которых отсутствует их мелкомасштабная изменчивость.

Таблица. 5.1. Распределение компонентов взвеси, хлорофилла и относительной прозрачности на станциях

	Глубина D, м	Концентрации						
№ ст.		общей взвеси С <sub>взв</sub> , мг∕л	минер. $C_{_{{\scriptscriptstyle {\rm BMB}}}}$ , мг/л	органич. С <sub>вов</sub> , мг/л	$C_{\scriptscriptstyle  m BOB}/C_{\scriptscriptstyle  m B3B,\%}$	Chl-a С <sub>а</sub> , мкг/л	ПИ, D <sub>430/665</sub>	Относит. прозрачн., Н, м
240501	45	0.75	0.61	0.14	18	0.23	2.9	8
240502	47	0.53	0.41	0.12	22	0.26	2.9	8
250501	25	0.93	0.78	0.15	16	0.22	3.1	8
250502	36	0.58	0.48	0.10	18	0.14	<b>3.</b> I	8
250503	46	0.83	0.70	0.13	16	0.22	3.0	8
250504	53.5	0.61	0.49	0.12	20	0.21	2.9	7-5
250505	53.8	0.45	0.33	0.12	27	0.25	2.9	7-5
260501	23	1.02	0.87	0.15	15	0.13	3.3	7
260502	21.5	0.82	0.68	0.14	17	0.16	<b>3.</b> I	7
260503	17.5	0.92	0.78	0.14	15	0.16	3.2	7-5
260504	22	0.92	0.76	0.16	17	0.20	3.3	6.5
260505	20.7	1.33	1.14	0.19	15	0.17	3.4	6.5
260506	22.5	0.89	0.75	0.13	15	0.20	3.3	6.5
260507	24.8	1.34	1.14	0.20	15	0.24	3.3	5.8
270501	19	0.95	0.80	0.15	16	0.18	3.4	7-5
270502	19.6	0.87	0.72	0.15	17	0.19	3.4	5.5
270503	24.5	0.87	0.72	0.15	17	0.23	<b>3.</b> I	5-5
270504	31	1.29	I.II	0.18	14	0.23	<b>3.</b> I	5
мин.	17.5	0.45	0.33	0.10	14	0.13	2.9	5
макс.	53.8	1.34	1.14	0.20	27	0.26	3.4	8
макс/мин	3.1	2.95	3.46	1.93	2	2.04	1.2	1.6
средн.	30.7	0.88	0.74	0.15	17	0.20	3.2	7.0



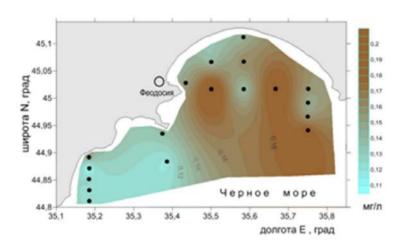
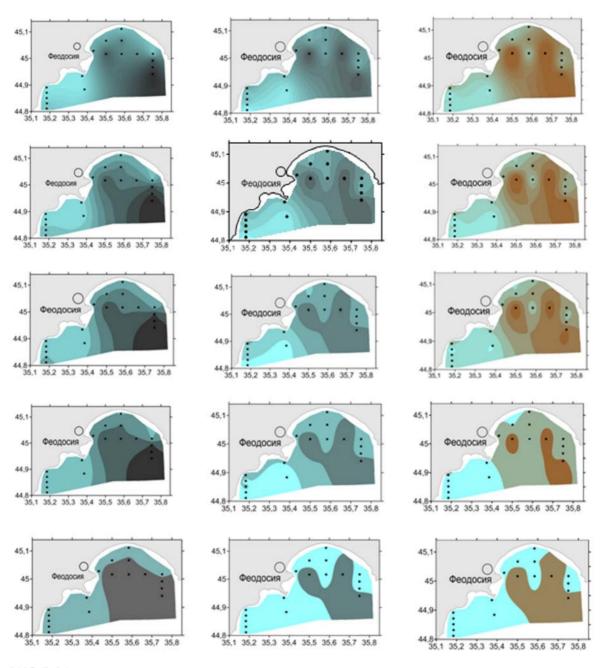


РИС. 5.13.

Распределение концентраций взвешенного минерального вещества  $C_{_{\text{вмв}}}$  (вверху) и взвешенного органического вещества  $C_{_{\text{вов}}}$  (внизу) на поверхности Феодосийского залива



#### РИС. 5.14.

Сравнение контрастностей картин распределения относительной прозрачности и концентраций минеральной и органической взвесей для разных масштабов осреднения. Левый столбец – относительная прозрачность H, в м; средний – концентрация взвешенного минерального вещества  $C_{_{\text{вов}}}$ , в мг/л; правый – концентрация взвешенного органического вещества  $C_{_{\text{вов}}}$ , в мг/л

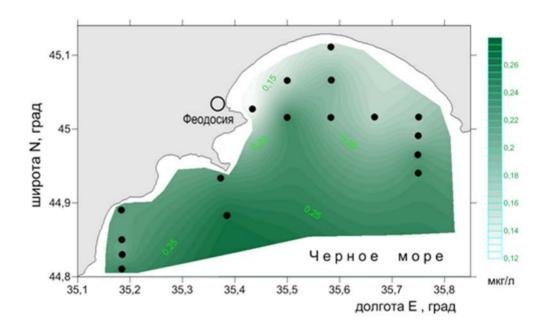


РИС. 5.15.

Распределение концентраций Chl-а – C<sub>а</sub> на поверхности Феодосийского залива

ГЛАВА 5

Предварительный анализ данных лидарного зондирования за отдельные дни измерений показал их хорошую согласованность и отсутствие хаотичности распределения параметров, что позволило сделать вывод о квазистационарности гидродинамических процессов за весь период проведения работ (рис. 5.16 – 5.18) и анализировать распределение измеряемых параметров не за отдельные периоды, а в комплексе. В период проведения работ в исследуемой акватории присутствовал меандрирующий фронт, который наиболее ярко выражен на карте распределения взвеси (рис. 5.18).

За период проведения работ концентрации измеряемых параметров изменялись в следующих пределах:

- Chl-a: 0.02 –0.8 мкг/л;
- BOB: 0.08 0.24 Mг/л;
- минеральная взвесь: О.4 2.5 мг/л.

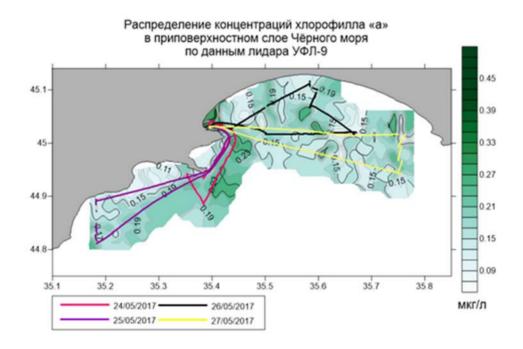


РИС. 5.16.

Распределение концентраций Chl-а в приповерхностном слое Черного моря по данным лидара УФЛ-9

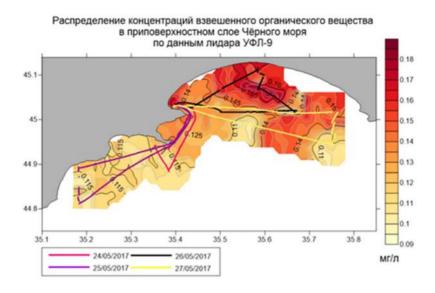
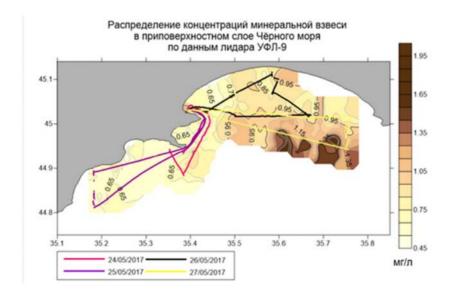


РИС. 5.17.

Распределение концентраций взвешенного органического вещества в приповерхностном слое Черного моря по данным лидара УФЛ-9



#### РИС. 5.18.

Распределение концентраций взвешенного минерального вещества в приповерхностном слое Черного моря по данным лидара УФЛ-9

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 5

- 1. *Бажин Н.М.* Метан в атмосфере // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 3. С. 52–57.
- 2. *Бордовский О.К., Чернякова А.М.* Современные методы гидрохимических исследований океана / Отчет ИО РАН. М. 1992. 200 с.
- 3. ГОСТ 17.1.04.02-90. «Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а». Госкомитет СССР по охране природы. М. 1990. 16 с.
- 4. Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В., Осадчиев А.А., Хлебопашев П.В., Пелевин В.В., Грабовский А.Б., Ижицкий А.С., Гончаренко И.В., Соловьев Д.М., Полухин А.А. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293-293.
- 5. Ижицкий А.С., Завьялов П.О. Гидрофизическое состояние вод Феодосийского залива в мае 2015 г. // Океанология. 2017. Т. 57.  $\mathbb{N}^{0}$  4. С. 538-545.
- 6. *Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н.* Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 704-704.
- 7.  $\Phi$ едоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов-на-Дону // ЗАО «Ростиздат». М. 2005. 329 с.
- 8. Шимкус К.М., Москаленко В.Н., Райен В.Б., Питман В.К. Газоносные четвертичные отложения Прикерченской части Черноморского шельфа и их связь с прибрежнымилитофациями // Бюл. Московского Общества испытателей природы, отд. Геол. 1998. Т. 73, вып. 4. С. 51-55.
- 9. Palmer S. C. J., Pelevin V., Goncharenko I., Kovács A., Zlinszky A., Présing M., Horváth H., Nicolás-Perea V., Balzter H., Tóth V. Ultraviolet fluorescence LiDAR (UFL) as a measurement tool for water quality parameters in turbid lake conditions // Remote Sensing. 2013. T. 5. Nº 9. P. 4405-4422.
- 10. Pelevin V., Zlinszky A., Khimchenko E., Toth V. Ground truth data on chlorophyll-a, chromophoric dissolved organic matter and suspended sediment concentrations in the upper water layer as obtained by LIF lidar at high spatial resolution // International journal of remote sensing. 2017. T. 38. № 7. P. 1967-1982.

# ИССЛЕДОВАНИЕ БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Копелевич О.В.<sup>-</sup>, Артемьев В.А.<sup>-</sup>, Вазюля С.В.<sup>-</sup>, Глуховец Д.И.<sup>-</sup>, Салинг И.В.<sup>-</sup>, Юшманова А.В.<sup>-</sup>

# ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Цель выполненных исследований – получение для северо-восточной части Черного моря комплекса данных оптических и сопутствующих измерений в сочетании с данными спутниковых наблюдений для усовершенствования спутниковых методов оценки биооптических характеристик вод поверхностного слоя.

Были поставлены следующие основные задачи:

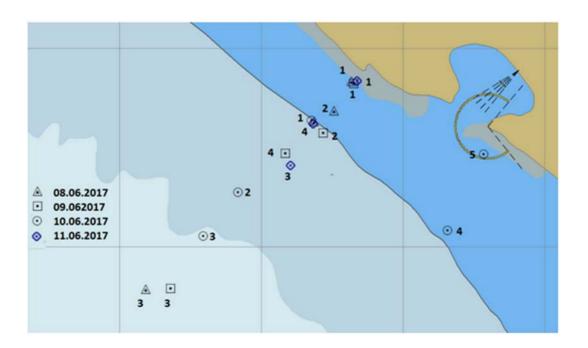
- натурные измерения комплекса оптических характеристик: спектральных коэффициентов яркости водной толщи; спектральной облученности поверхности моря и на разных горизонтах в водной толще, создаваемой нисходящим и восходящим потоками солнечного излучения; вертикальных профилей показателя ослабления света; спектральных показателей поглощения света морской водой; спектров флуоресценции растворенного органического вещества (РОВ) и Chl-а, возбуждаемой лазерным излучением разных спектральных диапазонов; глубины видимости белого диска (относительной прозрачности морской воды);
- одновременные измерения гидрологической структуры вод и вертикального распределения флуоресценции Chl-а посредством СТD-зонда;

- отбор проб с различных глубин для определения концентраций Chl-а и взвешенного вещества, количественного и видового состава фитопланктона, гидрохимических характеристик;
- сбор данных спутниковых сканеров цвета MODIS-Aqua, MODIS-Terra, VIIRS в течение всего периода экспедиции, а также в предшествующий (начиная с апреля) и последующий (до конца июля) периоды;
- совместный анализ данных натурных и спутниковых измерений для валидации спутниковых алгоритмов оценки параметров кокколидофоридного цветения, содержания хлорофилла и взвеси.

#### ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнялись на стандартном разрезе в створе Голубой бухты, а также на отдельных станциях на траверсе Геленджикской бухты. Карта расположения станций в период выполнения работ на этапе приведена на рисунке 6.1.

За время проведения этапа с 05.06 по 14.06.2017 г. были выполнены 4 выхода на МНИС «Ашамба»: 08, 09, 10 и 11 июня. Работы на дрейфовых станциях обычно начинались с



#### РИС. 6.1.

Расположение станций в период выполнения работ на этапе

гидрофизических измерений (зондирования СТD-зондом и погружаемым прозрачномером). На мелководных станциях проводилось зондирование всей водной толщи и заканчивалось на расстоянии 3 метра до дна (расстояние определялось по альтиметру СТD-зонда). На глубоководных станциях (≥ 500 метров) измерения проводились примерно до 160 метров и охватывали верхнюю границу сероводородного слоя. При сильном дрейфе работы на станции приостанавливались, и судно возвращалось с исходную точку. На некоторых мелководных станциях работы проводились на якоре.

Во время работы под спутником приоритет отдавался световым измерениям.

Гидрофизические измерения проводились в 2 этапа. На первом проводилось зондирование до максимальной глубины с измерением вертикальных профилей погружаемым прозрачномером. После подъема на палубу данные прозрачномера считывались и сопоставлялись с данными, полученными СТD-зондом. Выбирались горизонты для отбора проб. Стандартный отбор производился с трех горизонтов: і м, максимум и под максимумом флуоресценции, при необычном профиле добавлялся еще один горизонт. Отобранные пробы подготавливались для транспортировки в береговую лабораторию для измерений на лабораторных приборах спектральных показателей поглощения света морской водой и спектров флуоресценции РОВ и пигментов фитопланктона, для определений концентраций хлорофилла и взвеси, количественного и видового состава фитопланктона, гидрохимических характеристик в лабораториях ЮО ИО РАН и в Москве.

Спутниковые данные скачивались ежедневно с сайта NASA (http://oceancolor.gsfc. nasa.gov), где они размещаются в свободном доступе. Использовались данные уровня L2 спутниковых сканеров цвета MODIS-Aqua, MODIS-Terra, VIIRS, полученные в безоблачных условиях. По эти данным посредством региональных алгоритмов рассчитывались показатели поглощения желтым веществом и рассеяния назад взвешенными частицами, концентрации Chl-а и взвешенного вещества, параметры кокколитофоридных цветений (Kopelevich et al., 2014, 2015). Результаты расчетов использовались для построения карт пространственных распределений вышеуказанных параметров и температуры поверхности моря (по данным сканера MODIS-Aqua); карты уровня L3 рассчитывались усреднением данных L2 на сетке 3х3 км. При благоприятных погодных условиях во время подспутниковых измерений на станции проводилось количественное сопоставление значений параметров, рассчитанных по спутниковым значениям уровня L2 и усредненных по 9 пикселям вокруг данной станции, с данными прямых определений.

#### МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения производились комплексом специализированной оптической аппаратуры. Перед отправкой в экспедицию все приборы комплекса прошли техническое обслуживание и калибровку в лаборатории оптики океана ИО РАН.

**Плавающий спектрорадиометр ПРО-2** (рис. 6.2а) – основной прибор для верификации данных спутниковых измерений и разработки региональных биооптических алгоритмов (Артемьев и др., 2000). Он измеряет абсолютные величины спектральной яркости восходящего излучения непосредственно под поверхностью моря и спектральной облученности на поверхности, по которым рассчитывается спектральный коэффициент яркости водной толщи. Измерения выполняются на станциях. Результаты серии измерений (обычно 30 циклов) усредняются с помощью специально разработанного алгоритма. Непрерывный контроль изменений поверхностной облученности в этой экспедиции во время измерений осуществляется с помощью палубного блока измерителя облученности ВІС (Khrapko et al., 2007), установленного на баке МНИС «Ашамба» в свободном от затенения месте (рис. 6.2б). Для увеличения динамического диапазона канала яркости ПРО-2 используется нейтральный ослабитель в виде сетки.

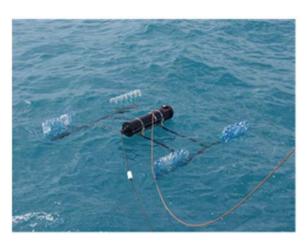




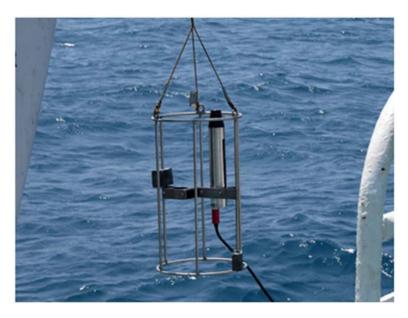
РИС. 6.2.

Плавающий спектрорадиометр ПРО-2 (слева) и палубный блок измерителя облученности ВІС (справа)

Перед экспедицией оба прибора были откалиброваны в лаборатории ИО РАН с помощью вторичного эталона спектральной облученности.

Гиперспектральный радиометр Ramses (модель IPS104-2) предназначен для измерения спектров облученности в диапазоне длин волн 320-1100 нм. Прибор устанавливался на специальной раме и опускался на тросе на заданный горизонт; информация передавалась на палубный блок по кабелю (рис. 6.3); регистрация и обработка информации проводилась с помощью специально разработанных программ.

Измерения проводились в течение 20 секунд (для усреднения), после чего прибор опускался на следующий горизонт и так далее. Глубина погружения определялась с помощью встроенного датчика давления.



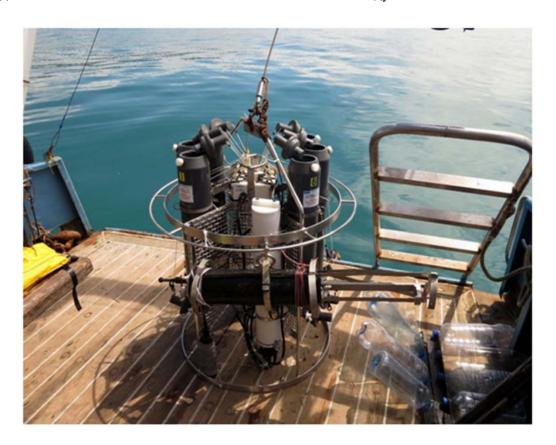
**Рис. 6.3.** Гиперспектральный радиометр Ramses

Для проведения измерений облученности снизу, создаваемой восходящим потоком солнечного излучения, прибор поднимался на палубу и устанавливался на раме коллектором вниз, измерения повторялись. По данным спектральных измерений подводной облученности сверху и снизу рассчитывались спектральные коэффициенты диффузного отражения  $R_{\rm d}(z)$  и показатели диффузного ослабления подводной облученности сверху  $K_{\rm d}(z)$  и снизу $K_{\rm u}(z)$  в зависимости от глубины z.

Прибор откалиброван компанией TRIOS по стандартам NIST.

Измеритель показателя ослабления (прозрачномер) ПУМ предназначен для измерения вертикального распределения показателя ослабления света С и температуры Т в зондирующем режиме (Артемьев и др., 2008). Напряжение питания подается от встроенных аккумуляторов, запись информации производится на внутреннюю энергонезависимую память. После окончания зондирования информация считывается на ноутбук напрямую, через интерфейсный кабель или через промежуточное устройство переноса данных. Включение прибора производится внешним магнитом. В экспедиции для экономии времени забортных работ прозрачномер ПУМ устанавливался на раме системы отбора проб СТD-зонда − измерения проводились одновременно двумя приборами (рис. 6.4). Ошибка измерения абсолютных значений показателя ослабления воды составляет порядка 0.02 м⁻¹ при значениях  $C \le I.O M⁻¹$ , когда в измеряемом объеме воды

преобладает однократное рассеяние; при больших значениях С проявляется много-кратное рассеяние, и ошибка возрастает. Контроль стабильности работы ПУМ производится по значениям показателя ослабления света на воздухе.



#### РИС. 6.4.

Прозрачномер ПУМ и СТD-зонд на раме батометрической системы отбора проб

Калибровка прибора проводится ежегодно в лабораторных условиях в ванне с бидистиллированной водой с разными оптическими базами.

*СТD-зонд с системой отбора проб SBE 19 plus* (рис. 6.4) использовался для измерения вертикальных распределений гидрологических параметров морской воды: температуры, солености и плотности, а также флуоресценции Chl-а в зависимости от глубины погружения. По команде с палубного модуля производилось поочередное закрытие одного из 6 пятилитровых батометров. Измерения проводились в реальном масштабе времени – обмен информацией между погружаемой частью и палубным блоком осу-

ществлялся по одножильному кабель-тросу, информация о текущих значениях измеряемых величин выводилась на экран ноутбука.

**Портативный спектрофотометр в конфигурации ICAM** (Integrating Cavity Absorption Meter) разработан на кафедре биофизики Биологического факультета МГУ (рис. 6.5).



РИС. 6.5.
Портативный спектрофотометр (Погосян и др., 2009)

Основная часть прибора — интегрирующая сфера, внутренняя поверхность которой имеет специальное диффузно отражающее покрытие с очень высоким коэффициентом отражения; для проведения измерения сфера заполняется исследуемой водой. Коллимированный пучок света от лампы мощностью 100 Вт направляется внутрь сферы, после многократных отражений часть рассеянного водой излучения выводится на спектрометр USB 4000 (Ocean Optics, CША) через небольшое боковое отверстие, расположенное вне оси входного светового пучка; входной пучок в спектрометр не попадает. Перед проведением измерений с морской водой проводятся измерения в пустой сухой сфере и в сфере, заполненной чистой дистиллированной водой. Расчет показателя поглощения проводится с помощью программы, разработанной в Лаборатории оптики океана ИО РАН (Глуховец и др., 2017).

**Двухканальный лазерный спектрометр ЛС-2** разработан в Лаборатории оптики океана ИО РАН и предназначен для регистрации спектров флуоресценции РОВ и Chl-a,

возбуждаемой лазерным излучением фиолетового и зеленого диапазона (Гольдин и др., 2015). В качестве источников возбуждающего излучения используются малогабаритные полупроводниковые лазеры с длинами волн излучения  $\lambda_{_1}$  = 405 нм и  $\lambda_{_2}$  = 532 нм. Исследуемый образец морской воды заливается в кювету из оптического стекла емкостью 35 мл. Прошедшее через кювету излучение, обусловленное флуоресценцией, по гибкому световоду поступает на вход малогабаритного спектрометра Ocean Optics Flame. Спектральный диапазон регистрации 200–850 нм. Питание спектрометра и передача данных в ПК осуществляется по USB-кабелю. Для управления спектрометром, а также для обработки и регистрации спектров используется специальная программа Ocean Optics Spectra Suit. Общий вид лазерного спектрометра показан на рисунке 6.6.



#### РИС. 6.6.

Лазерный спектрометр ЛС-2

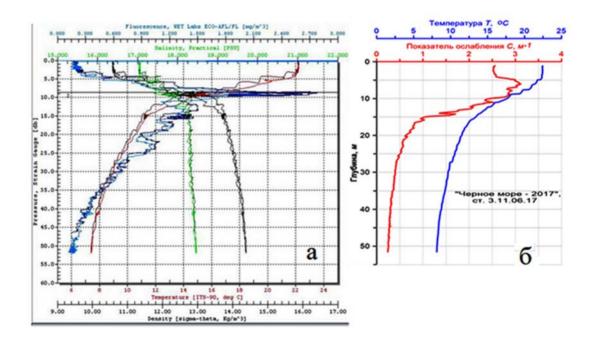
Белый диск (диск Секки) использовался для определения глубины видимости.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В период экспедиции на 16 дрейфовых станциях был выполнен полный комплекс измерений всеми оптическими приборами, проведен отбор проб на видовой состав фитопланктона, хлорофилл, взвесь и гидрохимию. Обработка данных спутниковых измерений показала, что в 2017 году в районе исследований наблюдалось самое мощное кокколитофоридное цветение за всю историю наших спутниковых наблюдений с 1998 г. (Копелевич и др., 2015): максимальное значение концентрации клеток кокколитофорид по всем спутниковым данным составило около 15 млн кл/л, тогда как в 2016 г. было  $\sim$  1.5 млн кл/л, в 2015 - < 0.5 млн кл/л.

На рисунке 6.7а в качестве примера приведены результаты гидрофизических измерений на станции  $3\_11.06.2017$  г., а на рис. 6.76 – профили показателя ослабления и температуры по данным прозрачномера ПУМ. По сравнению с 2016 годом значения показателя ослабления в подповерхностном слое на этой станции возросли с 1.2 до  $\sim 3$  м $^{-1}$ , при этом толщина слоя цветения практически не изменилась и составила  $\sim 10$  м, существенно уменьшилась глубина видимости белого диска: с 7 до 2 м, что соответствует результатам спутниковых измерений.

Следует отметить низкие значения флуоресценции хлорофилла в поверхностном слое, что характерно для цветения кокколитофорид, у клеток которых невысокое удельное содержание Chl-а. Максимум флуоресценции располагается на нижней границе слоя цветения, на глубине ~ 9 м. Аналогичная ситуация наблюдалась и в экспедиции 2016 года.

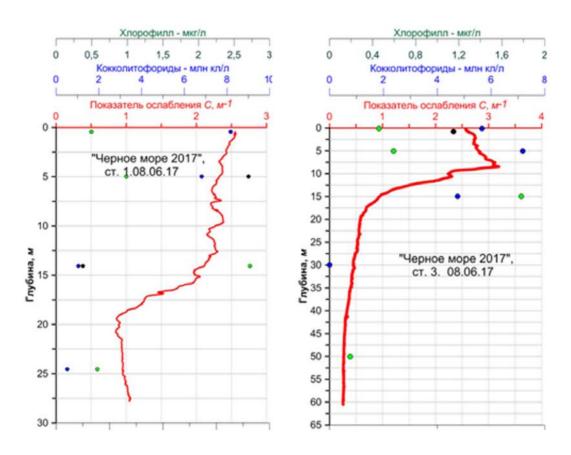


#### РИС. 6.7.

Станция 3\_11.06.2017г. Профили температуры, солености, плотности и флуоресценции по данным CTD-зонда (а), показателя ослабления и температуры по данным прозрачномера ПУМ (б)

На рис. 6.8 показаны вертикальные распределения показателя ослабления, концентраций хлорофилла, клеток кокколитофорид и взвеси по данным прямых определений

на пробах на прибрежной станции I (глубина 25 м) и глубоководной станции 3 (глубина ~1500 м) 08.06.2018 г.



#### РИС. 6.8.

Вертикальные распределения показателя ослабления (красные профили), концентраций хлорофилла (зеленые кружки), клеток кокколитофорид (синие) и взвеси (черные) на прибрежной станции 1 (глубина  $30\,$  м) (слева) и глубоководной станции  $3\,$  (глубина  $100\,$  м) (справа)  $100\,$  м) (справа)  $100\,$  м)

Обратим внимание, что на обеих станциях высокая концентрация клеток кокколитофорид (порядка 6-8 млн кл/л) наблюдается в верхнем 5-метровом слое, а концентрация хлорофилла в этом слое невелика: 05-1.0 мкг/л на прибрежной станции и 0.4-0.6 мкг/л на глубоководной. На горизонтах 14-15 м концентрация клеток кокколитофорид уменьшается до  $\sim$ 1 млн кл/л на прибрежной и  $\sim$  2 млн кл/л на глубоководной, тогда как концентрация хлорофилла, наоборот, возрастает – до 2.7 мкг/л и 1.8мкг/л соответственно. Это связано с изменением видового состава фитопланктона – в верхнем 5-метровом

слое безраздельно доминируют кокколитофориды – 95-95% по биомассе на прибрежной станции и 89-97% на глубоководной. На горизонте 14-15 м их доля сокращается до 67-71%, появляются другие доминантные виды – динофлагелляты (17.6 и 10.3%) и мелкие флагелляты (10.3 и 16.6%) соответственно на прибрежной и глубоководной станциях. Удельное содержание хлорофилла у этих видов выше, чем у кокколитофорид, что и приводит к увеличению концентрации хлорофилла.

По результатам измерений гиперспектральным радиометром Ramses рассчитывались параметры распространения солнечной радиации в водной толще, в частности показатели диффузного ослабления нисходящей и восходящей облученности  $K_{\rm d}$  и  $K_{\rm u}$ . На рисунке 6.9 показаны вертикальные распределения величин подводной облученности (и показателей  $K_{\rm d}$  и  $K_{\rm u}$ ) сверху и снизу для различных спектральных диапазонов. На рисунке 6.10 приведены вертикальные распределения величин  $\Phi$ AP (станция 3\_08.06.2017 г.). На этих графиках стратификация показателя ослабления отразилась в виде изменения наклона кривых вблизи горизонта 10 м.

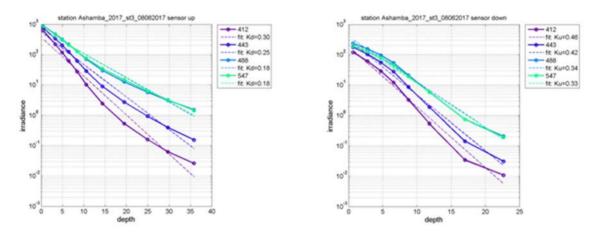
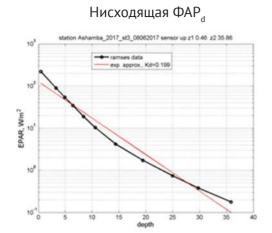


РИС. 6.9.

Станция 3\_08.06.2017 г. Вертикальное распределение величин подводной облученности и значения показателей диффузного ослабления  $K_a$  и  $K_a$  сверху (слева) и снизу (справа) (мВт м $^{-2}$  нм $^{-1}$ ) для четырех спектральных каналов: 412, 443, 488 и 547 нм

Флуоресцентные измерения проводились с помощью лазерного спектрометра ЛС2. Синий лазер (401 нм) позволяет получить информацию о спектре флуоресценции окрашенной части растворенного органического вещества (ОРОВ) и Chl-а, зеленый и оранжевый (532 и 595 нм) - Chl-а, фикоэритрина, фикоцианина и некоторых других пигментов фитопланктона.

ГЛАВА 6



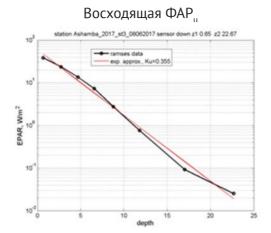
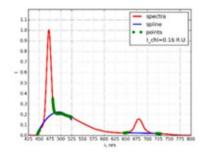
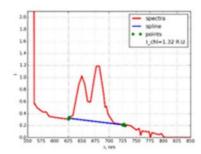


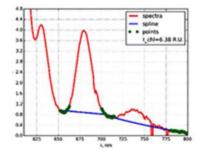
РИС. 6.10.

Вертикальные распределения ФАР (Вт/м²) по глубине, м

На рисунке 6.11 представлены спектры флуоресценции, полученные на ст. 4\_09.06.2017. Можно отметить относительно невысокое содержание OPOB и Chl-а (пик с максимумом около 682 нм). При возбуждении длиной волны 595 нм проявляется флуоресценция фикоэритрина, что говорит о присутствии в воде цианобактерий.



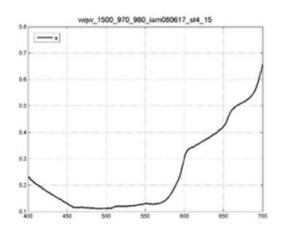


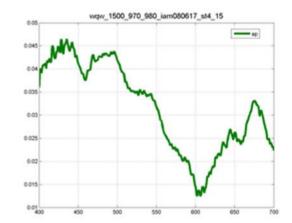


#### РИС. 6.11.

Спектры флуоресценции проб морской воды при длине волны возбуждения 401нм (слева), 532 нм (в центре) и 595 нм (справа). Горизонт 15 м

Измерения показателя поглощения света морской водой выполнялись с помощью портативного спектрофотометра в конфигурации ІСАМ. На левом рисунке 6.12 показаны спектры показателя поглощения морской водой для ст. 4\_08.06.2017. Низкие значения показателя поглощения в области 400-450 нм говорят о низком содержании ОРОВ, что согласуется с результатами флуоресцентных измерений. На правом рисунке 6.12 показаны спектры поглощения взвешенными в воде частицами, которые рассчитывались как разность между измеренными спектральными величинами показателя поглощения морской водой до и после ее фильтрации через фильтр с размером пор 0.4 мкм. Ненулевое поглощение в области 700 нм обусловлено главным образом терригенной взвесью, поскольку поглощение хлорофилла после максимума вблизи 680 нм быстро уменьшается до нуля. В области 420-460 нм сосредоточены коротковолновые пики поглощения Chl-а и хлорофилла «с» (полосы Соре). Поглощение в диапазоне 480-540 нм в значительной степени обусловлено каротиноидами. В области 600-700 нм расположены длинноволновые полосы поглощения Chl-а и хлорофилла «с».

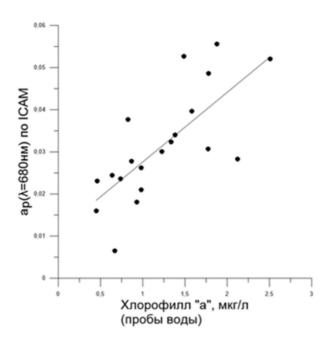




#### РИС. 6.12.

Спектры показателя поглощения морской водой (слева) и взвешенными частицами (справа). Горизонт 15 м, Черное море, 8 июня 2017 г.

На рис. 6.13 показана связь между концентрацией хлорофилла по данным прямых определений на пробах и показателем поглощения взвешенного вещества  $a_{\rm p}(680)$  на длине волны 680 нм, измеренным на приборе ICAM (20 пар измерений). Как видно, между этими величинами существует достаточно тесная корреляционная связь – коэффициент детерминации  $R^2$  равен 0.531 (коэффициент корреляции 0.729), что позволяет надеяться на разработку алгоритма для экспрессной оценки концентрации хлорофилла по данным о показателе поглощения.



### РИС. 6.13.

Связь между концентрацией хлорофилла по данным прямых определений на пробах и показателем поглощения взвешенным веществом  $a_{p}(680)$  на длине волны 680 нм, измеренным на приборе ICAM

Валидация спутниковых алгоритмов оценки биооптических параметров вод поверхностного слоя.

Как уже отмечалось выше, в 2017 году в северо-восточной части Черного моря наблюдалось самое мощное кокколитофоридное цветение за всю историю наших спутниковых наблюдений с 1998 г. Благодаря благоприятным погодным условиям по спутниковым наблюдениям удалось проследить зарождение и развитие этого цветения, начиная с середины мая до первой половины июня (рис. 6.14).

Как можно видеть из рисунка 6.14, цветение началось примерно в середине мая и достигло максимума в конце мая – первой декаде июля. Хотя цветение было необычным по интенсивности, отмеченная ранее закономерность (Буренков и др., 2011; Kopelevich et al., 2015) качественно проявилась и в 2017 г. – этому цветению предшествовала аномально холодная зима (средняя температура в феврале для восточной половины моря составила 7.95°С для открытой части и 7.65°С для шельфовой зоны).

Концентрации клеток кокколитофорид, рассчитанные по спутниковым данным посредством ранее разработанного регионального алгоритма (Kopelevich et al., 2014), вполне удовлетворительно согласуются с данными прямых микроскопических определений (эти определения проводились с.н.с. ИО РАН Л.А. Паутовой). Спутниковые кон-

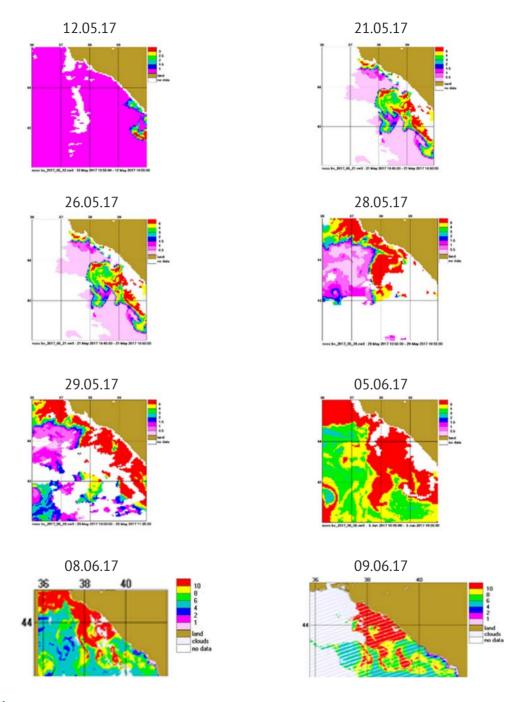


РИС. 6.14.

Развитие кокколитофоридных цветений в северо-восточной части Черного моря с 12 мая до 9 июня 2017 г. по данным спутниковых сканеров цвета (концентрация клеток кокколитофорид  $N_{\rm cor}$ , млн кл./л)

центрации оказались выше измеренных на пробах, но различия находятся в пределах оцененной ранее точности алгоритма. Так, максимальное по спутниковым данным значение концентрации клеток кокколитофорид  $N_{\rm coc}$ было рассчитано для ст.3\_11.06.2017 -  $\approx$  13 млн кл/л (данные сканера VIIRS); прямые определения для этой станции дали значение 8.1 млн кл/л, а на соседней станции 2\_11.06.17 – 9.6 млн кл/л. Как видно, относительная ошибка составляет порядка 50%, что можно считать вполне удовлетворительно.

На рис. 6.15 сопоставляются значения концентрации хлорофилла по данным прямых определений на пробах и рассчитанные по спутниковым данным. Как видно из рисунка, концентрации, рассчитанные по спутниковым данным, удовлетворительно согласуются с данными прямых измерений (измерения выполнялись с.н.с. ИО РАН С.А. Мошаровым). Коэффициент детерминации составил 0.679 (коэффициент корреляции 0.824), ошибка регрессии – 0.033 мкг/л, среднее значение по данным прямых определений – 0.48 мкг/л, по спутниковым – 0.42 мкг/л.

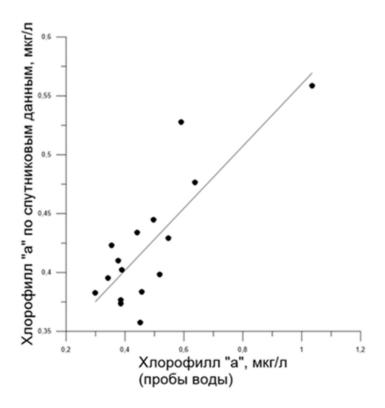


РИС. 6.15.

Сопоставление значений концентрации хлорофилла по данным прямых определений на пробах и по спутниковым данным

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- 1. В период экспедиции на 16 дрейфовых станциях выполнен полный комплекс оптических и сопутствующих измерений, проведен отбор проб для определения концентрации хлорофилла и взвеси, количественного и видового состава фитопланктона, гидрохимических характеристик. Одновременно собирались данные спутниковых сканеров цвета MODIS-Aqua, MODIS-Terra, VIIRS, по которым с помощью разработанных ранее региональных алгоритмов рассчитывались биооптические параметры вод поверхностного слоя.
- 2. Обработка спутниковых данных показала, что в 2017 г. в районе исследований имело место самое мощное за всю историю наблюдений (с 1998 г.) кокколитофоридное цветение, концентрация клеток достигала значений 15 млн кл/л. Спутниковые наблюдения позволили установить, что цветение началось примерно в середине мая и достигло пика к концу первой декады июня.
- 3. Сопоставление рассчитанных по спутниковым данным концентраций клеток кокколитофрид и хлорофилла с данными прямых определений показало удовлетворительное согласие рассчитанных и измеренных значений и подтвердило работоспособность разработанных региональных алгоритмов.

Авторы выражают благодарность Е.В. Бардюковой, А.В. Зинченко, А.В. Лифанчук, А.И. Меньшикову, С.А. Мошарову, В. Очереднику, Л.А. Паутовой, В.А. Силкину, А.В. Федорову, С.В. Шеберстову, внесшим свой вклад в проведение измерений и обработку данных.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 6

- 1. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // Океанология. 2000. Т. 40. № 1. С. 148-155.
- 2. Артемьев В.А., Таскаев В.Р., Буренков В.И., Григорьев А.В. Универсальный малогабаритный измеритель вертикального распределения показателя ослабления света / «Комплексные исследования Мирового океана проект «Меридиан», Атлантический океан». М.: Наука, 2008. С. 165-172.
- 3. Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Вазюля С.В. Сезонные и межгодовые изменения биооптических характеристик Черного моря по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 190-199.

ГЛАВА 6

- 4. Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Копелевич О.В., Зайцева А.Ф., Погосян С.И. Измерения по-казателя поглощения морской воды с помощью интегрирующей сферы // Светотехника. 2017.  $\mathbb{N}^{0}$  5. С. 39-43.
- 5. Гольдин Ю.А., Шатравин А.В., Левченко В.А., Венцкут Ю.И., Гуреев Б.А., Копелевич О.В. Исследования пространственной изменчивости интенсивности флуоресценции морской воды в западной части Черного моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 1. С. 17-26.
- 6. Копелевич О.В., Вазюля С.В., Салинг И.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И. Электронный атлас «Биооптические характеристики морей России по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2014 гг.» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 99-110.
- 7. Погосян С.И., Дургарян А.М., Конюхов И.В., Чикунова О.Б., Мерзляк М.Н. Абсорбционная спектроскопия микроводорослей цианобактерий и растворенного органического вещества: измерения во внутренней полости интегрирующей сферы // Океанология. 2009. Т. 49. С. 934–939.
- 8. Khrapko A.N., Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Grigoriev A.V., Terekhova A.A., «New instrument for measuring surface and underwater irradiances», Proceedings of IV International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2007). Nizhny Novgorodburg. Sep. 2007. P. 271-275.
- 9. Kopelevich O., Burenkov V., Sheberstov S., Vazyulya S., Kravchishina M., Pautova L., Silkin V., Artemiev V., Grigoriev A. Satellite monitoring of coccolithophore blooms in the Black Sea from ocean color data // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 146. 25 April 2014. P. 113–123. doi:10.1016/j.rse.2013.09.009.
- 10. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V., Vazulya S.V., Sahling I.V. Coccolithophore Blooms in the North-EasternBlack Sea // Proceedings of the Twelfth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 15. 06-10 October 2015. Varna, Bulgaria, MEDCOAST, Mediterranean Coastal Foundation, Dalyan, Mugla, Turkey. 2015. V.I. P. 363-374.

# ИССЛЕДОВАНИЯ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА В ПРИДОННОМ СЛОЕ ВОД И РЕАКЦИИ ЗООБЕНТОСА НА УСЛОВИЯ ГИПОКСИИ/АНОКСИИ В ЗОНЕ КОНТАКТА ЧЕРНОМОРСКОГО ХЕМОКЛИНА С КОНТИНЕНТАЛЬНЫМ СКЛОНОМ

Стунжас П.А.<sup>1</sup>, Гулин М.Б.<sup>2</sup>, Иванова Е. А.<sup>2</sup>, Подымов О.И.<sup>1</sup>

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследований на данном этапебыла оценка современного состояния донных зооценозов в пределах малоизученного высокопродуктивного слоя черноморского редокс-хемоклина по количественным показателям пространственного распределения бентосных организмов и ключевых природных абиотических факторов среды.

Исследованиями решались следующие задачи:

- изучение закономерностей батиметрического распределения черноморского зообентоса в субоксидной зоне у побережья Северного Кавказа (Геленджик);
- анализ таксономического состава бентосной фауны субоксидной зоны Черного моря, обитающей в границах черноморского редокс-хемоклина.

Исследования проводились в субоксидной и сероводородной зонах Черного моря на акватории гидрофизического полигона РАН, непосредственно у места постановки зондирующего комплекса «Аквалог». Сроки проведения работ – 6 и 7 июля 2017 г.

 $<sup>^{1}</sup>$  Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, Москва

 $<sup>^2</sup>$  Институт морских биологических исследований, Россия, Севастополь E-mail: m\_qulin@mail.ru

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспедиционные исследования выполнялись на экспедиционном судне МНИС «Ашамба» с использованием следующего научного оборудования:

- I. CTD-зонд SBE 19 plus с кассетой батометров.
- 2. Герметично закрываемый трубчатый пробоотборник с акриловой грунтоотборной трубкой внутренним диаметром 5.35 см («Румолот»).
- 3. Высокоселективный LDO-оксиметр HQ4od (Hach, США).
- 4. Микроскоп МБИ-і (ЛОМО, СПб, Р $\Phi$ ) с объективом  $\times 8$ .
- 5. Лабораторный оксиметр-оптод PreSens производства фирмы GmbH Германия.

При выполнении бентосной съемки использовался грунтоотборник (трубка) «Румолот» производства ИМБИ, снабженный прозрачной акриловой трубкой с толщиной стенок 3 мм, внутренним диаметром 53,5 мм и высотой 30 см. Колонка вставляется в носитель «Румолота» из железобетона весом 16 кг с крепежной арматурой. На верхнем торце трубки расположен клапан с заслонкой из пластика с резиновым кольцевым уплотнителем, который имеет слабую отрицательную плавучесть. Заслонка лишена возвратной запорной пружины и закрывается при подъеме прибора под собственным весом в сочетании с напором встречного потока воды. Нижний конец трубки заострен по окружности и не содержит закупоривающего механизма, при подъеме трубки на палубу он вручную закрывается резиновой пробкой. Данная конструкция позволяет отбирать пробы преимущественно илистых грунтов. Получаемые колонки грунта сохраняют, как правило, ненарушенное строение с естественной слоистой текстурой осадка.

Непосредственно после доставки грунтозаборного устройства на палубу судна в колонке измерялась концентрация кислорода. Для анализа  $O_2$  в осадках был апробирован оксиметр-оптод PreSens. В нем свет возбуждения и люминесцентного отклика передаются по тонкому световоду, так что его чувствительный элемент, представляющий тонкий кружок диаметром 4 мм, может клеиться на внутреннюю поверхность сосуда (трубки «Румолот»), и определение  $O_2$  производится без открывания трубки.

Одновременно проводились гидрологические съемки зондом ЮО ИО РАН SBE 19 plus с кассетой батометров. Наличие растворенного кислорода в пробах придонной водной толщи проверяли в условиях, близких *in situ*. Для этого сразу после подъема СТД-зонда сенсор оксиметр-оптода LDO-HACH-HQIOd опускали в нижнюю часть батометра через его приоткрытую крышку.

Пробы осадков с содержащимися в нем зообентосными организмами из слоя грунта о-5 см фиксировались 76% раствором этанола для последующего подсчета организмов и таксономической идентификации в лаборатории ИМБИ. Учет донной фауны проводили с помощью микроскопа МБИ-1 с объективом ×8 в проходящем свете.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В Черном море, в отличие от большинства других морских водоемов Мирового океана, присутствуют два биологически деятельных слоя – традиционный приповерхностный (фотический) и глубинный слой редокс-хемоклина. Первичная продукция органического вещества в хемоклине сопоставима и даже способна превышать таковую в верхнем слое фотосинтеза (Сорокин, 1982; Гулин М.Б., Гулин С.Б., 1992).

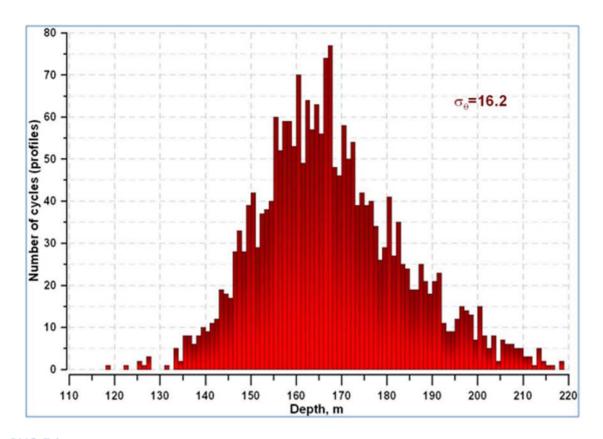
В результате проведенных в 2015 и 2017 гг. экспедиционных исследований на МНИС «Ашамба», в нижней части шельфа и начале континентального склона в районе Геленджика, рядом с местом постановки автономного зонда «Аквалог», обнаружено скопление донных организмов средней размерной (мейобентосной) фракции, преимущественно Protozoa. Максимум численности бентосных поселений в хемоклине на траверзе Геленджика зарегистрирован на изобате 238-244 м (284 и 892 экз./100 см², соответственно). Данное скопление донной фауны охватывает по вертикали слой не менее 45 м. При этом в горизонтальной проекции, с учетом относительно малых углов наклона дна, он, несомненно, является гораздо более протяженным.

Результаты хорошо согласуются с данными более ранних исследований в западной части Черного моря (Sergeeva, Gulin, 2007; Гулин, 2013).

Сотрудниками ИО РАН произведен статистический анализ результатов двухлетнего непрерывного (с интервалом каждые 4 часа) мониторинга вертикальной стратификации водной толщи вблизи шельфово-склоновой зоны, выполнявшимся автономным зондом «Аквалог» вплоть до придонного слоя на глубине 265 м. Оказалось, что вертикальные колебания глубины изопикны 16.2, обычно соответствующей местоположению верхней границы сероводородной зоны черноморской пелагиали, могут происходить в интервале глубин 125-215 м с преобладающим залеганием вблизи изобаты 167-168 м (рис. 7.1). Несимметричность гистограммы на данном рисунке может свидетельствовать также, что верхняя граница  ${\rm H_2}{\rm S}$ -зоны должна чаще обнаруживаться ниже изобаты ~ 170 м, чем в вышележащих горизонтах (Зацепин и др., 2014).

Аналогичный вид имеют колебания нижней границы распределения кислорода, находящейся обычно в районе изопикн 15.85-15.9, которые в районе склона располагаются на 30-40 м выше изопикны 16.2.

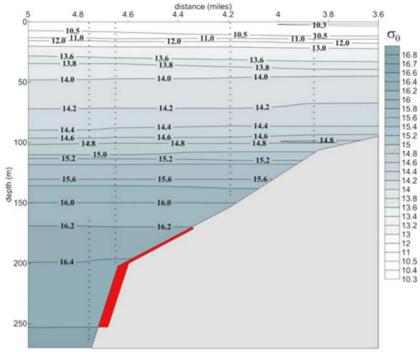
Установленные закономерности пространственно-временной динамики редоксзоны (хемоклина) в месте его контакта со склоном дна указывают, что обнаруженный нами глубинный максимум численности зообентоса залегает в перманентно сероводородной зоне Черного моря (рис. 7.2). На глубине 215 м обнаружены только одноклеточные организмы – инфузории, тогда как в зоне глубинного максимума численности зообентоса (гл. 238 м) мейобентосное сообщество значительно разнообразнее. Следует отметить, прежде всего, присутствие здесь многоклеточных гидробионтов (круглые черви, ракообразные). Также многочисленны и одноклеточные организмы, в т.ч. инфузории.



**РИС. 7.1.** Диапазон глубин предполагаемого местонахождения верхней границы H<sub>2</sub>S у склона дна северо-восточной части Черного моря, определяемый по глубине залегания изопикны 16.2

Вместе с тем остается открытым вопрос об обеспеченности кислородом или, возможно, альтернативными акцепторами электронов для дыхания этого глубоководного скопления эукариотных организмов – как одноклеточных, так и Metazoa. Этот природный феномен является новым для науки и требует специальных дополнительных исследований, которые начались в 2017 г. и планируется проводить и в 2018 г.

Во время съемки 2017 г. СТD-зонд SBE 19 plus был дополнен оксиметром-оптодом производства ЦАГИ (г. Жуковский) (Стунжас и др., 2013). Над склоном с глубинами 110-300 м нижний горизонт проникновения растворенного кислорода фиксировался на глубине 115-120 м. В то же время верхняя граница зоны  $\rm H_2S$  (изопикны 16.2) была на глубине 136-140 м. Известно, что на склоне заглубление изопикн происходит при развитом Основном черноморском течении, а их подъем соответственно при его ослаблении, что характерно для летних месяцев.



Density (sigma-theta), R/V "Ashamba"

### РИС. 7.2.

Местоположение глубинного скопления зообентоса на кромке шельфа, в верхнем слое сероводородной зоны (выделено красным). Глубина наибольшей численности организмов – 244 м

Для анализа  $O_2$  в осадках был апробирован оксиметр-оптод «PreSens». В первую очередь была проверена пригодность оптода для целей работ. Калибровка проводилась в сосуде с аргоном чистоты 99.98%. Она показала, что при нулевом содержании  $O_2$  прибор с рабочим спотом 3 показывает величины  $25\pm15$  мкг/л  $O_2$ . Таким образом, минимально измеряемая концентрация  $O_2$  составляет 15 мкг/л, и реальный динамический диапазон прибора составляет примерно 600 против значения 200, указанного в паспорте. Для сравнения чувствительность метода Винклера (при рутинных измерениях, т.е. без специальной аппаратуры) составляет 3 мкМ, что примерно равно 100 мкг/л, это делает оптод привлекательным для настоящих работ, тем более что измерения можно проводить без открывания сосуда.

В нашем случае спот был наклеен на высоте 19 см от нижнего края трубки «Румолот». В 2017 г. удалось взять только 2 трубки с осадком с глубин 215 и 238 м. В первом случае спот оказался в осадке на глубине 2 см и показал (с учетом поправки) концентрацию О

25±15 мкг/л, во втором — на глубине 6 см 50±15 мкг/л. С одной стороны, такой результат подтверждает результаты бентосных измерений, причем в точке с более высокой концентрацией бентоса найдена более высокая концентрация  $O_2$ . Но чисто формально, первый результат (т.е. что  $O_2$ >О) недостоверен, второй — достоверен, но вызывает вопросы. Как показывают измерения  $O_2$  в осадках Черного моря, кислород обычно наблюдают только в верхнем слое толщиной менее I см [Гулин, 2013], потому присутствие его на глубине 6 см, скорее всего, является артефактом из-за возможности загрязнения осадка кислородом при подъеме. Таким образом, по нашим измерениям нельзя однозначно утверждать, что обнаружено присутствие  $O_2$  в указанных выше точках отбора проб осадка (Стунжас и др, 2018).

Учитывая результаты определения  ${\rm O_2}$ , «Румолот» был усовершенствован. Его крышка была дополнена кругом диаметром 15 см, так что набегающий поток воды при спуске открывал клапан, а при подъеме – держал его плотно закрытым. В трубку поместили два спота на высоте 23 и 28 см, а также вместо резиновой пробки приготовили подвижный поршень, которым можно было передвигать осадок с водой так, чтобы споты могли анализировать содержание на разных расстояниях от осадка и внутри его. Заметим, что чувствительность спота 6 той же фирмы, который мы планируем закупить в будущем, примерно в 20 раз выше.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 7

- 1. *Гулин М.Б.* Батиметрическое распределение живых активных форм зообентоса в хемоклине Черного моря // Морск. Экологич. журн. 2013. Т. 12. № 1. С. 5-17.
- 2. *Гулин М.Б., Гулин С.Б.* Бактериальный хемосинтез в сероводородной толще. / В кн.: Поликарпов Г.Г. Молисмология Черного моря. Киев.: Наукова думка, 1992. С. 10-28.
- 3. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфо-склоновой зоне Черного моря // Известия РАН. Физика, атмосфера и океан. 2014.  $N^{o}$  1. С. 16-29.
- 4. Сорокин Ю.И. Черное море. М.: Наука, 1982. 241 с.
- 5. Стунжас П.А., Мошаров В.Е., Радченко В.Н. Возможности фотолюминесцентного метода измерения концентрации кислорода в сравнении с другими методами // Океанология. 2013. Т. 53. № 4. С. 507-516.
- 6. Стунжас П.А., Гулин М.Б., Зацепин А.Г., Иванова Е.А. О возможности присутствия кислорода в верхнем слое осадков сероводородной зоны Черного моря // Океанология. 2018. (в печати).
- 7. Sergeeva N.G., Gulin M.B. Meiobenthos from an active methane seepage area in the NW Black Sea // Marine Ecology an Evolutionary Perspective, Special topics volume 'Ecology and evolution of vent, seep and whalefall organisms'. 2007. V. 28. I. P. 152-159.

# ИСПЫТАНИЕ НОВЫХ АВТОНОМНЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

### Островский А.Г.

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Регулярные и подробные наблюдения за комплексом параметров, отражающих состояние морских экосистем, нужны для оценки воздействий хозяйственной деятельности на экологическое состояние акваторий. Антропогенный стресс приводит к нарушению естественного функционирования морских экосистем и к последствиям, негативным для морского промысла, рекреационного состояния регионов и вредным для здоровья человека. Это особенно актуально для шельфовой зоны Черного моря.

В России оперативный мониторинг ведется главным образом службами Росгидромета в трех основных направлениях:

- для оперативной подготовки диагностических и прогностических материалов, необходимых для гидрометеорологического обслуживания морской деятельности;
- для выполнения научных исследований в области разработки и верификации моделей, методов и технологий расчета и прогноза основных параметров морской природной среды;
- для получения необходимых расчетных параметров, используемых при проектировании судов, различных гидротехнических сооружений, портов, платформ и т.д.

Службы оперативной океанографии опираются на наблюдательную сеть. В составе морских наблюдательных сетей все большую роль играют автоматизированные

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН E-mail: osasha@ocean.ru

измерительные системы, особая роль в которых отводится заякоренным станциям (см., например, http://www.oceansites.org/).

В ряду заякоренных станций особое место занимают автономные зонды-профилографы, предназначенные для измерений вертикальных профилей основных гидрофизических параметров и обладающие возможностями самопозиционирования в подводном звуковом канале. К заякоренным автономным мобильным техническим средствам вертикального зондирования морской среды относятся зонды, периодически вытравливаемые с помощью заякоренных донных и поверхностных лебедок, а также профилографы, перемещающиеся по вертикально натянутому тросу на буйковых станциях (Островский, 2018).

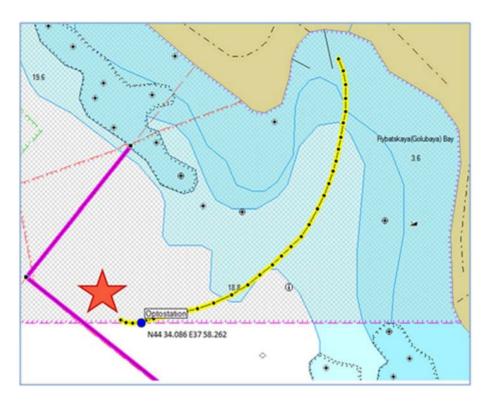
По Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 3 в ИО РАН был разработан и изготовлен опытный образец станции автоматического зондирования водной толщи до поверхности моря, в его прибрежной зоне. Станция АЗВТ предназначена для контактных измерений в автоматическом режиме вертикальных распределений гидрофизических и биооптических параметров водной среды (солености, температуры, давления, взмученности, флуоресценции Chl-а и др.) в заданной точке исследуемой акватории морского шельфа или внутреннего водоема. Станция состоит из плавучего модуля на заякоренной тросовой линии, намотанной на барабан электролебедки. Модуль оснащен СТD-зондом с дополнительными измерительными датчиками и модемом для передачи данных по мобильной связи. Назначение станции – осуществление периодических зондирований водной толщи в процессе подъема плавучего модуля от придонного слоя до поверхности моря, измерение при этом вертикальных распределений гидрофизических и биооптических параметров и оперативная передача данных потребителю.

Задачей этапа экспедиции «Черное море – 2017» стали испытания нового оборудования станции АЗВТ. Место проведения испытаний: Черноморский гидрофизический полигон, Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (г. Геленджик). Глубина мест постановки станции 18-28 м (рис. 8.1). Подготовка к натурным испытаниям и их реализация с последующей обработкой данных проводилась в период с 16 по 22 октября 2017 г.

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

Постановка станции на дно и ее поднятие со дна проводились с борта МНИС «Ашамба».

Для контроля профиля скорости течения в районе испытаний были использованы данные измерений донной станции с акустическим доплеровским профилографом скорости течения ADCP RDI WHS 600 кГц, расположенным на расстоянии около 200 м



### РИС. 8.1.

Район натурных испытаний на выходе из Голубой бухты. Красная звездочка – место постановки станции 19 октября 2017 г. Синий кружок – место расположения постоянно действующий донной станции с акустическим доплеровским профилографом течений ADCP RDI WHS 600 кГц, данные измерений которого передаются в реальном времени в приемный пункт на причале ЮО ИО РАН по оптоволоконной линии связи (желтая линия)

от места испытаний станции A3BT и подключенным к береговому пункту электропитания и приема данных с помощью оптоволоконной линии связи.

Предъявленное к испытаниям изделие представляет собой малогабаритную, надежную и удобную роботизированную профилирующую систему, с ресурсом электробатареи для автономной работы в течение как минимум і месяц, позволяющей: получать вертикальные профили характеристик водной среды от придонного слоя 50 м до поверхности моря в шельфовой зоне; передавать оперативно данные измерений потребителю. Станция имеет положительную плавучесть в воде, находясь в вертикальном положении датчиками вверх. Станция оснащена лебедкой, причем верхний конец троса намотан на барабан лебедки, а нижний крепится к якорю, установленному на дне (рис.

ГЛАВА 8

8.2). Принципиально возможно размещение станции на подповерхностной плавучести глубоководной буйковой станции, с целью зондирования водного слоя над плавучестью до поверхности воды и оперативной передачи данных измерений. При погружении и подъеме станция проводит измерения параметров водной среды с помощью СТD-зонда. По достижении поверхности моря, определяемой по датчику давления, изменяется направление вращения мотора электропривода, вследствие чего меняется направление вращения барабана лебедки. Таким образом, периодически разматывая и наматывая несущий трос, станция то поднимается, то опускается в водной толще, проводя измерения вертикальных распределений параметров водной среды.

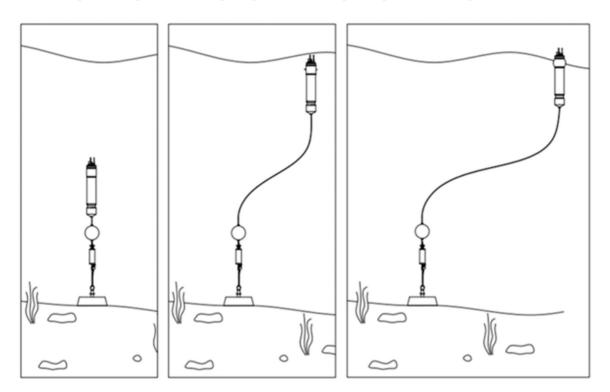


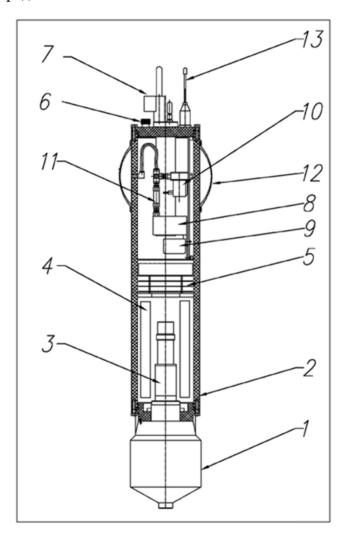
РИС. 8.2.

Схема работы станции автоматического зондирования водной толщи

Конструктивно станция состоит из нижеследующих частей (рис. 8.3):

- прочного корпуса,
- электромеханической лебедки,
- пневматической системы изменения плавучести,
- блока питания,

- модуля электроники,
- комплекта измерительных датчиков,
- модема и антенн радиосвязи.



### РИС. 8.3.

Схема продольного разреза разработанного изделия: (1) – система всплытия-погружения с электролебедкой, (2) – прочный герметичный аппаратурный корпус удобообтекаемой формы, (3) – электропривод лебедки, (4) – блок батарей, (5) – микропроцессорная система управления и контроля, (6) – датчик наружного давления, (7) – СТД зонд; (8-12) – опциональный комплекс пневматического оборудования всплытия-погружения в составе: пневматический насос (8), электропривод пневматического насоса (9), электроклапан (10), запорный клапан (11), наружная расширительная емкость (12); (13) – терминал связи с антенной

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные работы этапа заключались в проверке автономной работы станции A3BT в условиях морских течений.

К испытаниям был подготовлен опытный образец станции АЗВТ.

Для измерений электропроводности, температуры и давления воды на станции АЗВТ был смонтирован зонд RBR Concerto CTD с датчиком взмученности (рис. 8.4). Океанологические датчики возвышаются над крышкой, а контроллер датчиков располагается внутри прочного корпуса в его верхней части. Это позволяет производить измерения параметров невозмущенной морской среды при подъеме станции к поверхности моря.

Постановка станции A3BT на дно и ее натурные испытания изделия проводились 19 октября 2017 г. на МНИС «Ашамба».



Рис. 8.4.

Станция в сборе с CTD-зондом RBR Concerto на пирсе Южного отделения ИО РАН (Голубая бухта, г. Геленджик)

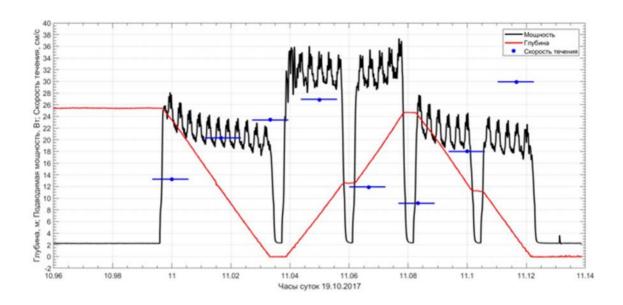
В ходе испытаний были выполнены:

- выход МНИС «Ашамба» в точку, находящуюся в 50 м ниже по дрейфу от координат постановки станции автоматического зондирования водной толщи;
- 2) спуск маркерного буя на фале длиной 30 м;
- 3) спуск груза весом 10-15 кг, который подвязан как к концу фала маркерного буя, так и к тросовой оттяжке длиной 60 м, ведущей к якорю (основному грузу) станции. При этом сама станция, якорь и катушка с частью тросовой оттяжки (30 м) остаются на судне;
- 4) переход на малом ходу в точку постановки станции, медленное стравливание тросовой оттяжки;
- 5) спуск на воду станции автоматического зондирования водной толщи, причем на коротком конце троса станции прикреплен якорь, который остается на борту судна;
- 6) сброс якоря за борт судна;
- 7) автоматический режим многократного повторения цикла погружение-всплытие A3BT с одной остановкой на заданном горизонте как на траектории подъема, так на траектории погружения;
- 8) подъем станции на борт судна;
- 9) расшифровка лог-файла и файла данных измерений СТД-зонда.

Станция выполнила 11 циклов с предустановленными переменными значениями ШИМа электропривода лебедки. На участках подъема станции к поверхности моря потребление энергии электроприводом составляло 18-28 Вт, а на участках спуска – 28-38 Вт (рис. 8.5). Превышение энергопотребления при спусках объясняется избыточной плавучестью станции примерно в 20 Н. Пилообразный график энергопотребления амплитудой 5-6 Вт с периодом примерно 12 с связан с возвратно-поступательными перемещениями барабана лебедки.

При скорости течения 0.08-0.32 м/с время подъема станции с глубины 25 м составляет 130 с, а погружения – примерно 135 с. То есть скорость профилирования лежит в пределах 18-19 см/с. При росте скорости течения и, соответственно, увеличении горизонтального дрейфа изделия в течении время на подъем возрастает. На скорости течения около 0.5 м/с время пребывания изделия после всплытия на поверхности воды сокращается из-за того, что течение начинает затягивать изделие под воду. Отчасти этот эффект связан с плохообтекаемой формой дополнительной плавучести установленной в верхней части цилиндрического корпуса станции. Тем не менее, мощности электропривода хватает на преодоление сил плавучести и гидродинамического сопротивления при намотке троса на барабан лебедки при погружении изделия.

Доработка станции АЗВТ и ее последующие испытания будут выполнены в 2018 г.



### РИС. 8.5.

Временная изменчивость контролируемых параметров. Красная линия показывает график наружного давления во время выполнения первого цикла профилирования. Черная линия – подводимая мощность на электроприводе. Синие кружки – средние значения скорости течения за определенные отрезки времени (показаны синими линиями) по данным измерения донного ADCP, установленного на расстоянии 200 м от места проведения испытаний станции A3BT

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 8

*I.* Островский А.Г. Заякоренные мобильные профилирующие аппараты // Освоение глубин Мирового океана. Оружие и технологии. (Ред.: А.Б. Нерсесов). М: 2018. (в печати)

## МОРСКАЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ

Кочетов О.Ю.<sup>1</sup>, Швоев Д.А.<sup>1</sup>, Цибульский А.Л.<sup>1</sup>

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения многих океанологических задач необходимы представления об атмосферных условиях. Обычно для этого используются данные измерений береговых метеостанций или данные реанализа. При использовании метеорологических параметров, полученных на береговых метеостанциях Северо-Кавказского побережья, часто приходится сталкиваться с проблемой их некорректного определения. Проблема заключается в том, что на качество измерений таких метеостанций оказывает влияние гористый рельеф местности. Так, при измерении параметров ветра, метеостанции регистрирует «локальные особенности», которые могут существенно отличаться от динамики приземного слоя атмосферы над открытыми участками моря.

Последние десятилетия стала оказывать влияние и урбанизированная среда. Разрастание городов (поселков) привело к тому, что ранее открытые участки метеостанций оказались окруженными зданиями и сооружениями, часто высотными. Так, на измерения ветра метеостанции г. Геленджика стал оказывать влияние высотный корпус отеля «Кемпинский», возведенный в 2010 году в непосредственной близости от метеоплощадки. Особенно это влияние проявилось в измерениях «норд-оста», в направлении на который был построен отель.

Целью данных исследований является получение более корректных и неискаженных рельефом местности метеорологических данных, необходимых для достоверной оценки параметров приводного слоя атмосфера в районе черноморского полигона ИО РАН «Геленджик» (http://polygon.ocean.ru/index.php).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН E-mail: realspinner@gmail.com

В рамках выполненных в 2017 году работ решались задачи:

- установка метеорологической станции на заякоренном навигационном буе на акватории гидрофизического полигона на достаточно большом удалении от берега и городских застроек, минимизирующем их влияние на данные измерений;
- отработка системы оперативной передачи данных измерений на береговой сервер с их размещением в сети интернет.

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

Метеорологическая станция состоит из трех блоков: морского, берегового и сетевого. Блоки соединены между собой каналами связи, по которым осуществляется передача данных, управление и контроль работы. Морской блок служит для измерения погодных параметров, береговой блок осуществляет прием и хранение данных, получаемых от морского блока, а сетевой блок обеспечивает доступ к полученным данным для пользователей через сеть Интернет (рис. 9.1).





### РИС. 9.1.

Морской навигационный буй БМС-85 с автоматической метеостанцией, установленный на полигоне ИО РАН в прибрежной зоне Черного моря в районе г. Геленджик (слева) и моноблочный влагозащищенный измерительный модуль AIRMAR 200WX-IPX7 Ultrasonic Weather Station в комплекте с приемником GPS/ГЛОНАСС (справа)

В состав морского блока входит измерительный модуль AIRMAR 200WX-IPX7 Ultrasonic Weather Station, выполняющий автоматическое измерение через регулярные интервалы времени (I секунда) комплекса параметров: температуры и относительной влажности, скорости и направления ветра, географических координат, скорости и направления перемещения самого модуля, а также углов отклонения от вертикали по двум осям. Поступающие от измерительного модуля данные обрабатываются управляющим микроконтроллером STM32F103C8T, который осуществляет накопление данных за 10-минутный интервал, подготовку пакета усредненных метеоданных и телеметрической информации и отправку их в береговой центр приема данных. Благодаря использованию ультразвукового анемометра, в конструкции измерительного модуля отсутствуют подвижные механические части, что значительно улучшает его эксплуатационные характеристики в морских условиях.

Беспроводной канал связи обеспечивает радиомодуль LoRa F30 на базе чипа SemtechSX1276, обладающий выходной мощностью IBт в диапазоне 433 МГц. Благодаря использованию для передачи данных модуляции стандарта LoRa, удается стабильно передавать данные на расстояние более 7 км. Дополнительное использование при формировании и расшифровке пакетов данных помехоустойчивого кодирования по алгоритму Рида-Соломона дает возможность автоматически исправлять до 16 ошибок, что позволяет эффективно бороться с искажениями, возникающими при передаче информации. Радиомодуль оснащен антенной с круговой диаграммой направленности.

Система электропитания морского блока состоит из аккумуляторной батареи 12В, 36 А/ч, контроллера заряда и трех панелей солнечных элементов, мощностью по 20 Вт каждая. Контроллер заряда обеспечивает зарядку аккумулятора от панелей солнечных элементов и контролирует состояние аккумулятора, не допуская разряда ниже уровня напряжения 10 В.

Все компоненты морского блока метеостанции смонтированы на морской навигационный буй БМС-85, произведенный в ПЦКБ «Стапель» (г. Ростов-на-Дону). Высота буя от поверхности воды - 6 м, измерительный модуль и антенна передатчика установлены на верхней площадке. Буй заякорен в ~7.5 км от берегового блока, свободный ход якорного каната позволяет бую смещаться от точки постановки в области с радиусом примерно 100 м. Кроме того, буй относительно свободно вращается по вертикальной оси, впрочем, это не создает помех радиосвязи благодаря использованию всенаправленной передающей антенны.

Береговой блок представляет собой компьютер, установленный в служебном помещении на причале ЮО ИО РАН, к которому подключен приемник с направленной антенной. Приемник полностью аналогичен по устройству передатчику, установленному на морском блоке метеостанции, различие только во встроенном программном обеспечении.

Компьютер берегового блока выполняет функции получения, разбора и валидации поступающих от морского блока пакетов данных, долговременное хранение полученной информации и ее ежеминутное копирование в сетевой блок. Для связи с сетевым блоком используется проводное соединение с локальной вычислительной сетью Института, обеспечивающее выход в сеть Интернет.

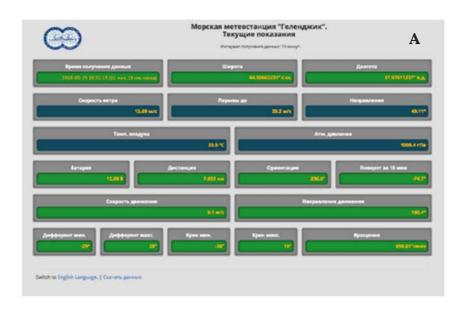
Сетевой блок представляет собой WEB-сайт, работающий на виртуальном частном сервере, размещенном в дата-центре ИО РАН (рис. 9.2). Он обеспечивает доступ к текущим измерениям, а также позволяет получать массивы накопленных данных за выбранный период времени и просматривать графики, отображающие динамику заряда/разряда батареи, что облегчает планирование работ по обслуживанию морского блока метеостанции.

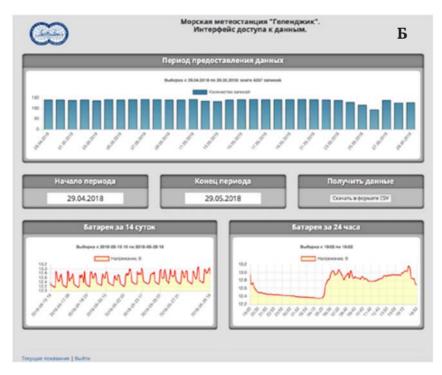
### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Метеостанция функционирует начиная с октября 2017 года. За время ее работы накоплено более 22 тысяч записей погодных параметров (по состоянию на 1 июня 2018 г.), при этом непрерывные интервалы составляют в среднем около 2 месяцев.

Сравнение с данными о скорости ветра от наземных метеостанций, расположенных в районе г. Геленджик, показывает, что измерения, полученные от морской станции, оказываются всегда выше, чем измерения береговых станций. При этом разница измерений возрастает при увеличении скорости ветра.

Хотя превышение скорости ветра над морем по сравнению с его скоростью над землей имеет вполне понятное объяснение (уменьшенное трение воздуха о воду по сравнению с трением о землю), величина этого превышения, достигающая 3-4 раза, представляется чрезмерной. Возможные причины такого превышения в настоящее время изучаются. Существует предположение о необходимости коррекции измерений метеостанции с учетом раскачки буя вследствие волнения морской поверхности. Для ответа на этот вопрос необходимо накопление данных, получаемых от измерительного модуля морского блока в сыром виде, без усреднения. Чтобы обеспечить сбор, хранение и передачу массивов сырых данных в настоящее время ведется разработка нового комплекта электроники морского блока, оснащенного большим объемом энергонезависимой памяти и средствами беспроводной связи, пригодной для скоростной передачи больших объемов информации.





### РИС. 9.2.

Изображения интерфейса пользователя: текущие измерения (вверху); доступ к накопленным массивам данных (внизу)

### Заключение

В ходе выполнения Программы комплексной научной экспедиции ИО РАН «Черное море – 2017» были получены следующие основные результаты.

- 1. Гидрофизический полигон автономных станций ИО РАН, развернутый в 2012-2013 гг. в шельфовой склоновой зоне Черного моря района г. Геленджика, продолжает работать и выполнять свои основные функции получение квазинепрерывных рядов гидрофизических данных с высоким пространственно-временным разрешением. Работы в 2017 г. способствовали его дальнейшему развитию, совершенствованию средств и методов океанографических наблюдений. Введены в эксплуатацию новые средства гидрометеорологических измерений (морская метеостанция), проведены очередные пробные испытания опытного образца станции автоматического зондирования водной толщи. Произведено усовершенствование оперативной передачи данных (внедрение многоканальной системы оптоволоконной связи, оперативной передачи данных по радиоканалу) а также реализовано повышение надежности некоторых автономных измерительных станций (в частности, термокос).
- 2. Пополнена база данных о трехмерной пространственной структуре поля течений на акватории полигона на основе совместного использования данных высокочастотного доплеровского радара, буксировок ADCP и дрифтеров поверхностного слоя.
- 3. Выполнена оценка состояния основных физических, химических и биологических компонентов черноморской экосистемы в зависимости от внешних условий (в том числе, после холодной зимы 2016-2017 гг.), а именно: пространственной структуры и других характеристик холодного промежуточного слоя; оптической структуры вод, положения, параметров и пространственно-временной изменчивости слоев мутности; положения верхней границы зоны сероводородного заражения и параметров зоны взаимодействия аэробных и анаэробных вод.
- 4. Показано, что впервые после 2013 г. произошло формирование ХПС с температурой ниже 8 °С. При этом произошло некоторое (менее 10 м) заглубление изопикнических поверхностей в пикно-халоклине, в частности изопикны 16.15, с которой связывают положение верхней границы сероводородных вод.
- 5. Обнаружено периодическое усиление сигнала обратного акустического рассеяния, измеряемого зондом-профилографом «Аквалог» в период с декабря 2016 г. по февраль 2017 г. На временной диаграмме вертикального распределения мощности сигнала обратного акустического рассеивания, характеризующего содержание взвеси в воде, 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 интенсивные, проникающие до дна течения на шельфе и верхней части континентального скло-

- на, производят взмучивание илистых 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 теплый период года полосы повышенного акустического рассеяния исчезают: активного взмучивания осадков не происходит из-за уменьшения скорости течения и появления плотностной стратификации, препятствующей развитию сильных придонных течений.
- 6. 2017 г. отличается от предыдущих лет феноменально высокими показателями мутности вод прибрежной зоны на судовом мониторинговом разрезе. Зарегистрированный первый раз 26 апреля, слой мутности с концентрациями >0.8 ntu простирался от поверхности до глубины 80 м. Концентрации мутности были несколько выше на ближних к берегу станциях, но, тем не менее, оставались очень большими на всем разрезе. Возможным объяснением феномена может быть адвекция замутненных вод Основным черноморским течением с более южных районов в период таяния накопившегося за период холодной зимы 2016-2017 гг. снежного покрова на участках высокогорья.
- 7. В прибрежно-шельфовой зоне Черного моря в 2017 году зафиксировано значительное уменьшение запасов минерального азота, в 1.7 раза по сравнению с прошлым годом, и увеличение содержания кремния (в 1.5 раза). По всей видимости, причиной этой изменчивости гидрохимического состава вод может быть холодный зимний период 2016-2017 гг. (большая глубина проникновения зимней конвекции) и состояние морских биологических сообществ (подавляющее преобладание кокколитофорид над цветением диатомеи в 2017 г.).
- 8. Получены новые данные о гидрооптических характеристиках прибрежных вод в период кокколитофоридного цветения за последние годы максимально сильного в 2017 г. Выполнено усовершенствование алгоритма расчета содержания Chl-а и взвеси в приповерхностном слое по спутниковым данным.
- 9. На примере Геленджикской и Голубой бухт выполнена оценка масштабов влияния антропогенных факторов на гидрохимическую структуру полузамкнутых акваторий прибрежных вод. Проведенные исследования концентраций техногенных загрязнений показывают, что уровень содержания тяжелых металлов, нефтепродуктов, фенолов в 1.5-2 раза выше для акваторий с затрудненным водообменом и повышенной рекреационной нагрузкой (Геленджикская бухта) по сравнению с другими прибрежными водами.
- 10. Выявлены некоторые механизмы формирования поля концентрации метана в прибрежной зоне Черного моря. В этой зоне сосредоточено значительное количество органических веществ, образующихся в толще вод вблизи берега и верхнем слое грунта, а также поступающих с материковым стоком. В условиях анаэробного разложения органики, которые создаются в бескислородных микронишах в воде (кишеч-

ные тракты зоопланктона, фекальные пеллеты), а также восстановленном осадке на дне, происходит образование биогенного метана. В частности, величины значений концентраций метана, полученные в период экспедиции в районе Феодосийского залива в 2017 г., в среднем в 15 раз превышали равновесное значение с атмосферным воздухом. В ряде предыдущих прибрежных экспедиций в северо-восточной части Черного моря на горизонтах 30–50 м был зафиксирован локальный максимум содержания метана, вероятно, связанный с накоплением в этой области зоопланктона. Таким образом, увеличение содержания метана в придонных водах на станциях с глубиной до 50 м может отражать общие закономерности его распределения в прибрежных водах.

- полувосстановленных форм (тиосульфата, сульфита, элементной серы) в анаэробной зоне Черного моря для оценки скорости и механизмов редукции сульфата и окисления сульфида. Уточнена оценка влияния бактериальных процессов на скорость образования сероводорода в анаэробной зоне Черного моря.
- 12. Оценена изменчивость сезонной динамики численности гребневиков-вселенцев и их влияние на пелагическую экосистему, включая бактериопланктон, фито-, зоо- и ихтиопланктон. На основании этой оценки сделан вывод о незначительном влиянии гребневиков-вселенцев на пелагическую экосистему в течение последних пяти лет.
- 13. После наблюдавшихся в 2001-2005 гг. катастрофических колебаний численности и биомассы двустворчатых моллюсков доминантов мелководных донных сообществ глубины 10-30 м в 2016-2017 гг. была отмечена стабилизация количественных показателей таксоцена. В современный период на северо-восточном побережье Черного моря в районе узкого шельфа количественные характеристики макрозообентоса и показатели разнообразия, по всей видимости, возвращаются к значениям XX века до начала эвтрофикации этого водоема.
- 14. Осуществлена постановка на внешнем шельфе (акватория гидрофизического полигона ИО РАН) морского навигационного буя с автоматической метеостанцией и системой оперативной передачи данных.
- 15. Выполнены успешные морские испытания опытного образца станции автоматического зондирования водной толщи от придонного слоя до поверхности моря в его прибрежной зоне (до глубины места 50-100 м).
- 16. Внедрены в практику черноморских исследований образцы новых оперативных средств связи и передачи данных (многоканальный узел связи на оптоволоконном кабеле, система передачи данных по радиоканалу), а также вспомогательных устройств (тралозащитные немагнитные пирамиды для донной установки ADCP и других измерительных приборов, поддерживающие трос плавучести, изготовленный из пластиковых труб, выдерживающие давление до 10 атм).

В связи с большой чувствительностью черноморской экосистемы к климатическим изменениям и антропогенному стрессу в прибрежной зоне в особенности целесообразно продолжить проведение комплексной экспедиции ИО РАН «Черное море» на МНИС БМП-74 «Ашамба» в 2018-м и последующие годы.

В дальнейшем, из-за существенного износа и большого возраста следует планировать замену МНИС БМП-74 «Ашамба» на более новое научно-исследовательское судно, желательно большего тоннажа и района плавания, не ограниченного 12-мильной прибрежной зоной. Введение в строй нового судна могло бы существенно расширить возможности черноморских исследований ИО РАН.

### Научное издание

### ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН

# НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПРИБРЕЖНОЙ ЭКСПЕДИЦИИ «ЧЕРНОЕ МОРЕ-2017» НА МНИС «АШАМБА»

Ответственные редакторы: Зацепин А.Г. Куклев С.Б.

Издательство «Научный мир» Москва, 2018

Официальный сайт – www.naumir.ru E-mail - naumir@naumir.ru Интернет-магазин научной книги – www.totbook.ru Адрес: г. Москва, Тихвинский переулок, д. 10/12, корп. 4, офис 91 Телефон: 8(499)973-25-13

Формат 190/240 мм Гарнитура PT Sans, Vollkorn, PT Serif

