# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ РАН»

На правах рукописи

# ЛАТУШКИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

# ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЩЕГО ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В РОССИЙСКОМ СЕКТОРЕ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА ПО ДАННЫМ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Специальность 1.6.17 – океанология

**ДИССЕРТАЦИЯ** 

на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель доктор географических наук Артамонов Юрий Владимирович

Севастополь – 2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
РАЗДЕЛ 1 ИЗУЧЕННОСТЬ ГИДРООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОД	
ЧЕРНОГО МОРЯ	27
1.1 Гидрооптические исследования в Черном море	27
1.2 Гидрооптические исследования в период: 1922 г. – 1960 г	27
1.3 Гидрооптические исследования в период: 1960 г. – первая	
половина 1990-х гг	29
1.3.1 Создание новой аппаратуры и развитие методов	
гидрооптических исследований	29
1.3.2 Результаты исследований	32
1.3.2.1 Исследование распределений показателя	
ослабления направленного света	32
1.3.2.2 Вертикальное распределение показателя	
ослабления направленного света в Черном море	32
1.3.2.3 Горизонтальное распределение показателя	
ослабления направленного света в Черном море	34
1.3.2.4 Межгодовая изменчивость относительной	
прозрачности в глубоководной части Черного моря по	
данным измерений с 1960–1995 гг	38
1.4 Гидрооптические исследования во второй половине 1990-х-	
2000-х гг	41
Выводы к разделу 1	43
РАЗДЕЛ 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	45
2.1 Методы и средства исследования	45
2.1.1 Спектральные измерители показателя ослабления	
направленного света СИПО4 и СИПО9	45

2.1.1.1 Используемые в работе измерители показателя
ослабления направленного света 45
2.1.1.2 Методологическая основа измерителей
показателя ослабления направленного света
2.1.1.3 Конструктивные особенности измерителей
СИПО 48
2.1.1.4 Оценка стабильности определения показателя
ослабления направленного света 55
2.1.1.5 Разработка программного обеспечения для
приема информации, получаемой с измерителей 59
2.1.1.6 Методы градуировки измерителей
2.1.1.7 Валидация разработанных измерителей 61
2.1.1.8 Связь показателя ослабления направленного
света с концентрацией взвешенного вещества
2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод
2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод проведения измерений
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод</li> <li>проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод</li> <li>проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод</li> <li>проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод</li> <li>проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод</li> <li>проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод проведения измерений</li></ul>
<ul> <li>2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод проведения измерений</li></ul>

3.1.2.3 Весенняя съемка 2019 года (18.04–13.05.2019) 83
3.1.3 Летние съемки
3.1.3.1 Количество съемок
3.1.3.2 Летняя съемка 2016 года (30.06–20.07.2016) 90
3.1.3.3 Летняя съемка 2017 года (14.06.17-4.07.17)
3.1.3.4 Летняя съемка 2018 года (09.06.18–1.07.18) 100
3.1.4 Осенние съемки104
3.1.4.1 Количество съемок 104
3.1.4.2 Осенняя съемка 2016 года (30.09–20.10.2016) 104
3.1.4.3 Осенняя съемка 2017 года (14.11–28.11.2017) 107
3.1.4.4 Осенняя съемка 2018 года (28.08–18.09.2018) 113
3.1.5 Зимние съемки 116
3.1.5.1 Зимняя съемка 2020 года (27.11–16.12.2020) 116
3.2 Обобщение полученных особенностей 121
3.2.1 Пространственная изменчивость 121
3.2.2 Сезонная изменчивость 128
Выводы к разделу 3 132
РАЗДЕЛ 4 ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
ГИДРООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОД ПРИБРЕЖНЫХ
АКВАТОРИЙ КРЫМА И ЕЕ СВЯЗЬ С ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ И
БИОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ
4.1 Гидрооптические исследования в прибрежных акваториях
Гераклейского полуострова 135
r epulatence o notifice i poba
4.2 Гидрооптические исследования в заливе Сиваш
<ul> <li>4.2 Гидрооптические исследования в заливе Сиваш</li></ul>
<ul> <li>4.2 Гидрооптические исследования в заливе Сиваш</li></ul>
<ul> <li>4.2 Гидрооптические исследования в заливе Сиваш</li></ul>
<ul> <li>4.2 Гидрооптические исследования в заливе Сиваш</li></ul>
<ul> <li>4.2 Гидрооптические исследования в заливе Сиваш</li></ul>

4.2.2.5 Съемка 14–15.05.2018 г	150
4.2.2.6 Съемка 7–9.11.2018 г.	152
4.2.2.7 Съемка 4–5.06.2019 г	155
4.2.2.8 Съемка 15–20.06.2020 г.	155
4.2.3 Обобщение полученных результатов	158
Выводы к разделу 4	161
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	163
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	166

# СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ФГБУН ФИЦ МГИ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»

ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»

ИО – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии имени П. П. Ширшова Российской академии наук

ВНИИ – Всесоюзный научно-исследовательский институт

ИКИ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук

СКТБ – специальное конструкторско-технологическое бюро

КБ – конструкторское бюро

ФЦП – Федеральная целевая программа

НИС – научно-исследовательское судно

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

ИСЗ – искусственный спутник Земли

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

РД – руководящий документ

КОС – канализационные очистные сооружения

ИК – инфракрасный

СВЧ – сверхвысокочастотный

МК – микроконтроллер

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

КПД – коэффициент полезного действия

ОЧТ – Основное черноморское течение

ВКС – верхний квазиоднородный слой

ХПС – холодный промежуточный слой

ВГТ – вертикальный градиент температуры

ВГС – вертикальный градиент солености

ВГП – вертикальный градиент плотности

РОВ – растворенное органическое вещество

ОВВ – общее взвешенное вещество

ПОС – показатель ослабления направленного света

СИПО – спектральный измеритель показателя ослабления направленного

## света

ПУМ – прозрачномер универсальный малогабаритный

ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler

CTD – conductivity, temperature, depth

Совв – концентрация общего взвешенного вещества

Соров – концентрация растворенного органического вещества

С<sub>хл</sub> – концентрация хлорофилла-а

ЕМФ – единицы мутности по формазину

ЕПС – единицы практической солености

#### введение

#### Актуальность темы исследования

В связи с происходящими климатическими изменениями и постоянно усиливающимся антропогенным воздействием на различные акватории Мирового океана, особенно на окраинные и внутренние моря, где эти изменения наиболее заметны, важной задачей является оценка и прогноз экологического состояния вод таких акваторий.

Взвешенное вещество является одним из неотъемлемых компонентов морской среды [1–4]. В природных водах во взвешенном состоянии находится большое количество минеральных и органических частиц, имеющих различное Состав и количество взвешенного в происхождение. воде вещества определяются природными и антропогенными факторами. В открытой части Черного моря в формировании состава взвеси преобладают природные факторы, связанные с развитием и жизнедеятельностью фитопланктона, основного продуцента в Мировом океане [5], а его пространственное распределение зависит от гидрологического режима и динамики ВОЛ. Фитопланктон преобразует солнечную энергию в органические вещества в процессе фотосинтеза, являясь начальным звеном пищевой цепи, обеспечивает пищу зоопланктону и через него рыбам и другим организмам более высоких трофических уровней [6–10]. В прибрежных районах Черного моря преобладают антропогенные факторы поступления взвешенных веществ в водные акватории, связанные с интенсивным освоением шельфа, ростом приморских городов, курортных объектов, массовой коттеджной застройкой побережья, а также с промышленными, сельскохозяйственными и бытовыми сбросами загрязняющих веществ [11].

Содержание взвешенного в воде вещества существенным образом влияет на ее прозрачность и проникновение в водную толщу солнечной энергии, особенно в диапазоне фотосинтетически активной радиации, которая

регулирует интенсивность процесса фотосинтеза. Таким образом, содержание взвешенного вещества определяет биологическую продуктивность вод, что делает важным мониторинг пространственного распределения его концентрации.

Традиционные методы определения содержания в воде взвешенного вещества (например, гравиметрический метод [12]) являются трудоемкими и требуют значительного времени для получения результата. Применение стандартного гравиметрического метода не позволяет проводить автоматизированный и оперативный мониторинг концентрации взвеси.

Являясь оптически активным компонентом, взвешенное вещество играет большую роль в формировании гидрооптической структуры водной среды. Для оперативного мониторинга содержания взвешенного вещества в настоящее время широкое распространение получили гидрооптические контактные методы, основанные на проведении измерений непосредственно в морской воде (методы in-situ) и методы дистанционного зондирования поверхностного слоя водной среды [1, 2, 13, 14].

Методы дистанционного зондирования при их несомненном достоинстве (высоком пространственном разрешении, оперативности получения данных) имеют ряд недостатков. Во-первых, алгоритмы, разработанные для открытых районов океана, плохо работают в прибрежных зонах в связи с поступлением в морскую воду значительных объемов вод, принесенных речным и иными береговыми стоками [15–19]. Это обусловливает завышение значений концентраций общего взвешенного вещества (OBB) антропогенного загрязняющих происхождения, a также других веществ, относительно концентраций [20]. Во-вторых, истинных дистанционные измерения захватывают лишь поверхностный слой [21] и не позволяют выявить особенности вертикальной структуры гидрооптических характеристик в подповерхностных слоях, а также оценить их связь с распределением термохалинных характеристик. В прибрежных районах, где отмечается особенно структура пространственная сложная гидрооптических

характеристик, контактные измерения являются незаменимыми, так как только использование современной высокоточной гидрооптической зондирующей аппаратуры обеспечивает возможность измерения их профилей с высоким разрешением по глубине.

Информативным параметром для определения содержания общего взвешенного в воде вещества контактными гидрооптическими методами является показатель ослабления направленного света (ПОС). Существует тесная связь между показателем ослабления направленного света и содержанием общего взвешенного в воде вещества. Корреляция между этими параметрами зависит от состава и свойств взвеси: размера, формы, показателя преломления частицы, цветового контраста и имеет региональный характер.

Для формирования представлений об особенностях пространственновременной изменчивости взвешенного вещества в различных акваториях Азово-Черноморского бассейна на современном уровне необходимо применение комплексного подхода в исследованиях, а также важно создавать новые и совершенствовать уже существующие методы и средства измерений [22-26].Совместный анализ гидродинамических, термохалинных И углубить гидрооптических данных позволит понимание механизмов формирования полей концентрации взвешенного вещества в полузамкнутых, прибрежных и открытых районах Азово-Черноморского бассейна. Большой объем при данных, который можно получать помощи современной зондирующей аппаратуры, С высоким пространственно-временным разрешением о концентрации взвешенного вещества и гидрологических позволит области c повышенным параметрах выделить содержанием взвешенного вещества, отследить их динамику и изучить особенности их вертикальной стратификации.

#### Степень разработанности темы исследования

Гидрооптические исследования Черного моря начались в 20-х годах XX века и вплоть до 60-х годов XX века ограничивались измерениями относительной прозрачности вод при помощи белого диска Секки [27–31]. С

60-х годов прошлого века, В СВЯЗИ С развитием гидрооптического приборостроения в океанологических институтах, в том числе и в Морском гидрофизическом институте, начали проводиться гидрооптические измерения с помощью разных зондирующих и буксируемых комплексов [32–35]. Одним из наиболее изучаемых гидрооптических параметров являлся показатель ослабления направленного света (ПОС) (прозрачность). По результатам крупномасштабных исследований Черного моря были получены представления об особенностях пространственного (3D) распределения гидрооптических Измерения ПОС выполнялись параметров. BO многих научноисследовательских рейсах, проводимых Морским гидрофизическим институтом в Черном море [36].

Начиная со второй половины 1990-х гг., в связи со сложной экономической ситуацией в стране, крупномасштабные исследования в Черном море существенно сократились, а к концу 1990-х гг. и вовсе прекратились. Начиная с 2000-х годов активизировались прибрежные гидрооптические исследования [37–46], в частности, Севастопольской бухты, бухт южного берега Крыма, Феодосийского залива, Керченского пролива. Начиная с 2010 года, когда в строй снова вошел НИС «Профессор Водяницкий», регулярные гидрооптические исследования стали проводиться и в открытой части Черного моря.

#### Объект и предмет исследования

Объект исследования – Азово-Черноморский бассейн. Предмет исследования – пространственные распределения полей взвешенного вещества и факторы, определяющие формирование этих полей в Азово-Черноморском бассейне.

#### Цель и задачи исследования

Цель исследования – определение закономерностей пространственновременной изменчивости поля общего взвешенного вещества в акваториях Азово-Черноморского бассейна, формирующихся под влиянием природных факторов и антропогенного воздействия.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1. создание новых средств измерения гидрооптических характеристик;
- проведение полевых исследований с помощью разработанной аппаратуры и создание новой базы данных гидрооптических характеристик для северной части Черного моря, прибрежных акваторий Севастополя и залива Сиваш;
- оценка эмпирических связей показателя ослабления направленного света и концентрации общего взвешенного вещества для исследуемых акваторий;
- 4. анализ пространственных распределений общего взвешенного вещества и их особенностей на синоптическом, сезонном масштабах, оценка их связи с гидрологической структурой вод по данным прибрежных и крупномасштабных съемок, выполненных в Российском секторе Азово-Черноморского бассейна.

#### Научная новизна полученных результатов

- 1. C использованием разработанной автором гидрооптической аппаратуры получены уникальные массивы данных ПОС с высоким трех пространственным разрешением ДЛЯ акваторий Азово-Черноморского бассейна (северная часть Черного моря, прибрежный Гераклейского Сиваш), участок полуострова, залив характеризующихся разной степенью влияния природных факторов и уровнем антропогенного воздействия.
- 2. Впервые получены статистически значимые СВЯЗИ между концентрацией взвешенного вещества И гидрологическими (температурой, соленостью, плотностью) параметрами В глубоководной зоне северной части Черного моря для различных сезонов года.
- Впервые выявлены закономерности распространения загрязнения из точечного источника в Голубой бухте (Севастополь) на основе совместных гидрооптических и гидрологических измерений.

 Впервые определено влияние изменения солености и интенсивности ветрового воздействия на пространственно-временное распределение концентрации общего взвешенного вещества в мелководном заливе Сиваш.

#### Теоретическая и практическая значимость работы

- 1. Результаты, полученные в рамках данной работы, позволили углубить понимание роли влияния гидродинамических и термохалинных процессов, а также метеорологических условий на распределение концентрации взвешенного вещества в полузамкнутых, прибрежных и открытых районах Азово-Черноморского бассейна.
- эффективность 2. Полученные результаты показывают высокую использования гидрооптических методов при проведении оперативного мониторинга содержания взвешенного вещества в акваториях. Их применение позволяет различных c высокой точностью идентифицировать источники поступления загрязняющих веществ, отследить пути их распространения.
- Данные, полученные в районе Голубой бухты (Севастополь), способствовали принятию решения руководством города Севастополя о проведении ремонтных работ в месте прорыва подводной трубы системы сброса сточных вод.

#### Методология и методы исследования

Основной методический подход в настоящей работе – получение новых гидрооптических и гидрологических натурных контактных данных и их комплексный анализ совместно с данными дистанционных и гидробиологических наблюдений.

Основными инструментами исследования были разработанные в отделе оптики и биофизики моря ФГБУН ФИЦ МГИ спектральные измерители показателя ослабления направленного света [47]. Дополнительно использовались данные различных зондирующих комплексов (Sea-Bird-911 plus, Idronaut Ocean Seven 320Plus, ADCP WORKHORSE-300 kHz, Кондор, ПУМ-200), а также данные спутниковых измерений, позволяющие провести комплексный анализ результатов гидрооптических исследований [48–51]. Для оценки биологических компонентов водной экосистемы, связанной с распределением оптических характеристик, проводился отбор проб воды и грунта [52, 53] с последующей обработкой их в лаборатории.

Анализ полученных данных проводился с использованием общепринятых методов корреляционного и статистического анализа.

#### Положения, выносимые на защиту

- Новая база гидрооптических данных, созданная на основе регулярных экспедиционных измерений с использованием разработанной при участии автора аппаратуры и содержащая более 1000 станций.
- 2. Корреляционные связи между горизонтальными распределениями концентрации общего взвешенного вещества И значениями температуры, солености и плотности морской воды, имеющие двухслойную структуру. Утверждение 0 TOM, что МИНИМУМ коэффициентов корреляции находится ниже ВКС, в слое высоких вертикальных градиентов термохалинных характеристик.
- 3. Закономерности сезонной изменчивости поля общего взвешенного вещества, заключающиеся основной В TOM, что максимум концентрации общего взвешенного вещества во все сезоны и располагается в пределах верхнего 20-метрового слоя. Наибольшее общего содержание взвешенного вещества В основном подповерхностном максимуме, также как и в ВКС, наблюдается в конце весны – начале лета в период интенсивного прогрева поверхностного слоя моря, а наименьшее – осенью, в период интенсивного выхолаживания воды.
- 4. Зависимость толщины слоя с максимальным содержанием общего взвешенного вещества от величины максимального вертикального градиента температуры, заключающаяся в том, что чем выше вертикальный градиент температуры в сезонном термоклине, тем

тоньше слой с максимальным содержанием общего взвешенного вещества.

- 5. Особенности распределения гидрооптических характеристик в акватории Голубой бухты в Севастополе, заключающиеся в наличие плюмов с высокими значениями гидрооптических параметров, приуроченные к поступлению сточных вод из разрыва подводного трубопровода очистных сооружений.
- 6. Изменение содержания общего взвешенного вещества в заливе Сиваш с 2014 г. по 2020 г., заключающееся в том, что с возрастанием солености после перекрытия Северо-Крымского канала в заливе увеличилась концентрация общего взвешенного вещества в 4–5 раз, что связано с замедлением осаждения частиц и увеличением абразии берегов. Пространственное распределение общего взвешенного вещества зависит от вектора скорости ветра и продолжительности его воздействия.

#### Степень достоверности результатов проведенных исследований

Сопоставление вертикальных профилей ПОС, полученных с помощью разработанных при участии соискателя образцов измерителей, с вертикальными профилями ПОС, полученными с использованием измерителей других производителей (мутномеры комплексов Кондор и Idronaut, а также прозрачномера ПУМ-200, разработанного в ИО РАН), показало хорошее согласование между ними.

Регрессионные соотношения, связывающие ПОС с концентрацией общего взвешенного вещества, получены непосредственно для каждой из трех акваторий (прибрежный район Севастополя, открытая северная часть Черного моря, залив Сиваш), в которых проводились исследования.

Степень достоверности научных результатов работы определяется анализом большого массива данных, который получен для трех акваторий Азово-Черноморского бассейна в различные сезоны и годы с высоким

пространственным разрешением и содержит более 1100 вертикальных профилей ПОС и гидрологических параметров.

#### Связь с научными программами, планами, темами

Работа выполнена в соответствии с планами научных исследований Морского гидрофизического института НАН Украины и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» в рамках следующих научно-исследовательских тем, проектов и грантов:

– Тема «Создание и развитие на основе современных технологий междисциплинарной океанографической системы мониторинга и прогноза состояния Черного моря» (шифр «Оперативная океанология»), 2010–2012 гг., исполнитель.

Проект «Разработка И создание автоматизированного гидрофизического комплекса попутных измерений контроля ДЛЯ сероводородной ЗОНЫ Черного моря, также a для экологического И биологического контроля поверхностного слоя морей и водоемов на ходу судна» (шифр «УКРФЕРРИ»), 2012–2015 гг., исполнитель.

– Проект RFMEFI57714X0110 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», исполнитель.

– Тема «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»), 2015–2017 гг., исполнитель.

– Тема «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология»), 2018–2020 гг., исполнитель.

– Тема «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология»), 2021–2023 гг., исполнитель.

### Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на различных научных мероприятиях:

 Международная научная конференция «Функционирование и эволюция экосистем Азово-Черноморского бассейна в условиях глобального изменения климата» (пгт. Кацивели, 2010 г.);

– Международная научно-техническая конференция «Системы контроля окружающей среды» (г. Севастополь, 2010 г., 2012 г.);

– Всероссийская конференция с международным участием «Современные проблемы оптики естественных вод» (г. Санкт-Петербург, 2011 г., 2013 г., 2015 г., 2017 г., 2019 г., 2012 г.);

– Международная научно-техническая конференция «Управление и мехатронные системы» (г. Севастополь, 2013 г.);

– Международная научная конференция «Интегрированная система мониторинга Черного и Азовского морей» (г. Севастополь, 2013 г.);

– Международная научно-практическая конференция «Биоразнообразие и устойчивое развитие» (г. Симферополь, 2014 г.);

 Международная научная конференция «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала Юга России» (пгт. Кацивели, 2014 г.);

– Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» (г. Москва, 2015 г.);

Молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования»
 (г. Севастополь, 2016 г.);

Всероссийская объединенная конференции «Экология. Экономика.
 Информатика» (г. Ростов-на-Дону, 2016 г.);

– Научная конференция «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология» (г. Севастополь, 2016 г.);

– XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана.
 Физика атмосферы» (г. Томск, 2016 г.);

– XV Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» (г. Москва, 2017 г.);

– II Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (г. Москва, 2017 г.);

– XXIII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Иркутск, 2017 г.);

– Научная конференция «Моря России: наука, безопасность, ресурсы» (г. Севастополь, 2017 г.);

– III Всероссийская конференция молодых учёных «Комплексные исследования Мирового океана» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.);

– XXIV Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана.
 Физика атмосферы» (г. Томск, 2018 г.);

– Всероссийская научная конференция «Моря России: методы, средства и результаты исследований» (г. Севастополь, пгт. Кацивели, 2018 г.);

Конференция «Итоги экспедиционных исследований в 2018 году в
 Мировом океане и внутренних водах» (г. Москва, 2019 г.);

– IV Всероссийская конференция молодых учёных «Комплексные исследования Мирового океана» (г. Севастополь, 2019 г.);

– XXV Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Новосибирск, 2019 г.);

– Всероссийская научная конференция «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования» (г. Севастополь, 2019 г.);

– XXVI Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Москва, 2020 г.);

 Конференция «Итоги экспедиционных исследований в 2020 году в Мировом океане и внутренних водах» (г. Москва, 2021 г.);

– XXVII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана.
 Физика атмосферы» (г. Москва, 2021 г.);

– XXVIII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2022 г.).

### Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы представлены в 66 работах, из них 15 статей в рецензируемых научных журналах, 1 патент на изобретение и 47 статей в сборниках трудов и материалов конференций.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 15 работ в рецензируемых научных изданиях и 1 патент на изобретение. В их числе 11 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу Web of Science, 14 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу SCOPUS и 1 работа в рецензируемом научном издании, входящем в перечень изданий ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. Latushkin A.A., Lee M.E., Martynov O.V. Some aspects of light emitting diode application in hydrooptical equipment // Light & Engineering. 2013. Vol. 21. № 3. Р. 50–52 (Ли М.Е., Латушкин А.А., Мартынов О.В. Некоторые аспекты применения сверхярких светодиодов в гидрооптической аппаратуре // Журнал светотехника. 2013. № 2. С. 45–46).

2. Kolesnikova E.A., Anufriieva E.V., **Latushkin A.A.**, Shadrin N.V. Mesochra rostrata Gurney, 1927 (Copepoda, Harpacticoida) in Sivash Bay (Sea of Azov): Is It a New Alien Species or a Relict of Tethys? // Russian Journal of

 Biological
 Invasions.
 2017.
 Vol. 8,
 № 3.
 P. 244–250.

 doi: 10.1134/S2075111717030079.

3. Shadrin N.V., Anufriieva E.V., Kipriyanova L.M., Kolesnikova E.A., **Latushkin A.A.**, Romanov R.E., Sergeeva N.G. The political decision caused the drastic ecosystem shift of the Sivash Bay (the Sea of Azov) // Quaternary International. 2018. Vol. 475. P. 4–10. doi: 10.1016/j.quaint.2017.12.009.

4. Lee M.E., Latushkin A.A., Martynov O.V. Long-term transparency variability of the Black Sea surface waters // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2018. Vol. 11.  $\mathbb{N}_{2}$  3. P. 40–46. doi: 10.7868/S207366731803005X (Ли М.Е., Латушкин А.А., Мартынов О.В. Долговременная изменчивость прозрачности поверхностных вод Черного моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. T. 11.  $\mathbb{N}_{2}$  3. C. 40–46. doi: 10.7868/S207366731803005X).

Vorobyev V.E., 5. Bondur V.G., Zamshin V.V., Serebryany A.N., Latushkin A.A., Li M.E., Martynov O.V., Hurchak A.P., Grinchenko D.V. Monitoring Anthropogenic Impact on Some Coastal Water Areas of the Black Sea Using Multispectral Satellite Imagery // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2018. Vol. 54. № 9. Р. 1008–1022. doi: 10.1134/S0001433818090098 (Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Замшин В.В., Серебряный А.Н., Латушкин А.А., Ли М.Е., Мартынов О.В., Хурчак А.П., Гринченко Д.В. Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям // Исследование Земли из космоса. 2017. № 6. С. 3-22. doi: 10.7868/s020596141706001x).

Kubryakov A.A., Aleskerova A.A., Goryachkin Yu.N., Stanichny S.V.,
Latushkin A.A., Fedirko A.V. Propagation of the Azov Sea waters in the Black sea under impact of variable winds, geostrophic currents and exchange in the Kerch Strait
// Progress in Oceanography. 2019. Vol. 176. Art. 102119. doi: 10.1016/j.pocean.2019.05.011.

7. Klyuvitkin A.A., Garmashov A.V., **Latushkin A.A.**, Orekhova N.A., Kochenkova A.I., Malafeev G.V. Comprehensive Studies of the Black Sea during the

Сruise 101 of the R/V Professor Vodyanitskiy // Oceanology. 2019. Vol. 59. № 2. P. 287–289. doi: 10.1134/S0001437019020097 (Клювиткин А.А., Гармашов А.В., **Латушкин А.А.**, Орехова Н.А., Коченкова А.И., Малафеев Г.В. Комплексные исследования Черного моря в 101-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» // Океанология. 2019. Т. 59. № 2. С. 315–318. doi: 10.31857/S0030-1574592315-318).

8. Shadrin N., Kolesnikova E., Revkova T., **Latushkin A.**, Chepyzhenko A., Drapun I., Dyakov N., Anufriieva E. Do separated taxa react differently to a long-term salinity increase? The meiobenthos changes in Bay Sivash, largest hypersaline lagoon worldwide // Knowledge and Management Aquatic Ecosystems. 2019. Vol. 420. Art. 36. 14 P. 36. doi: 10.1051/kmae/2019028.

9. Shadrin N., Kolesnikova E., Revkova T., **Latushkin A.**, Chepyzhenko A., Dyakov N., Anufriieva E. Macrostructure of benthos along a salinity gradient: The case of Sivash Bay (the Sea of Azov), the largest hypersaline lagoon worldwide // Journal of Sea Research. 2019. Vol. 154. Art. 101811. doi: 10.1016/j.seares.2019.101811.

10. Sovga E.E., Eremina E.S., Latushkin A.A. Research expeditions performed by Marine hydrophysical institute in the Sivash bay waters in Spring and Autumn, 2018 // Physical Oceanography. 2020. Vol. 27. № 2. P. 161–170. doi: 10.22449/1573-160X-2020-2-161-170 (Совга Е.Е., Ерёмина Е.С., Латушкин А.А. Экспедиционные исследования, проведенные Морским гидрофизическим институтом в акватории залива Сиваш весной и осенью 2018 года // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 176–185. doi: 10.22449/0233-7584-2020-2-176-185).

11. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Lee R.I., Sysoev A.A., Sysoeva I.V., Fedirko A.V., Martynov O.V. The Northern Part of the Black Sea Waters' Biooptical and Hydrology Structure Features in the Autumn Period 2016 // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2021. Vol. 13. № 3. P. 78–82. doi: 10.7868/S2073667320030065 (Латушкин А.А., Артамонов Ю.В., Ли Р.И., Сысоев А.А., Сысоева И.В., Федирко А.В., Мартынов О.В. Особенности биооптической и гидрологической структуры вод северной части Чёрного моря в осенний период 2016 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 13. № 3. С. 78–82. doi: 10.7868/S2073667320030065).

12. Shadrin N., Stetsiuk A., Latushkin A. Anufriieva E. Mercury in the world's largest hypersaline lagoon Bay Sivash, the Sea of Azov // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. №22. P. 28704–28712. doi: 10.1007/s11356-021-12745-9.

13. Anufriieva E., Kolesnikova E., Revkova T., **Latushkin A.**, Shadrin N. Human-Induced Sharp Salinity Changes in the World's Largest Hypersaline Lagoon Bay Sivash (Crimea) and Their Effects on the Ecosystem // Water. 2022. Vol. 14. №3. Art. 403. doi: 10.3390/w14030403.

14. Кудинов О.Б., **Латушкин А.А.** Универсальный автономный накопитель для повышения оперативности гидрооптических исследований insitu // Процессы в геосредах. 2018. Т. 17. № 3. С. 74–75.

15. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A., Fedirko A.V. The Relationship of the Spatial Structure of the Total Suspended Matter Concentration and Hydrological Parameters in the Northern Black Sea According to Contact Measurements // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022. Vol. 15. № 2. P. 124–137. doi: 10.48612/fpg/4heu-kxbn-gg7t (Латушкин А.А., Артамонов Ю.В., Федирко А.В. Скрипалева Е.А., Связь пространственной структуры концентрации общего взвешенного вещества и гидрологических параметров в северной части Черного моря ПО данным контактных измерений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 124–137. doi: 10.48612/fpg/4heu-kxbn-gg7t).

Патент на изобретение:

**1.** Латушкин А.А., Мартынов О.В. Патент РФ №2605640 на изобретение: Способ определения спектрального показателя ослабления направленного света в морской воде in situ. Опубликован 27.12.2016, бюллетень №36.

### Личный вклад соискателя

Автором совместно с сотрудниками отдела оптики и биофизики моря выполнена разработка двух опытных образцов измерителя показателя ослабления направленного света. Все тестовые испытания измерителей, их калибровки, сопоставления с подобными измерителями других производителей проведены лично соискателем. Соискателем были выполнены определения содержания общего взвешенного вещества гравиметрическим методом, а также получены массивы данных по ПОС для исследуемых акваторий. На основании были полученных массивов данных ИМ рассчитаны регрессионные соотношения, связывающие ПОС и концентрацию общего взвешенного вещества для трех акваторий Азово-Черноморского бассейна: открытой части Черного моря, прибрежных районов Севастополя и залива Сиваш. Совместно с соавторами выполнены оценки вертикальных распределений коэффициентов линейной связи между горизонтальными полями концентраций взвешенного вещества и гидрологическими параметрами. Выявлены особенности сезонной изменчивость общего взвешенного вещества, получена зависимость толщины слоя С его максимальным содержанием от величины максимального вертикального градиента температуры для северной части Черного моря. Исследовано влияние сточных вод, поступающих из разрыва подводного трубопровода очистных сооружений, на гидрооптическую структуру. Описаны механизмы, которыми можно объяснить общее увеличение концентрации взвешенного вещества в заливе Сиваш в результате роста солености после перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 г.

Планирование и реализация всех экспериментов, а также анализ и обсуждение результатов исследовательской работы проводились соискателем совместно с научным руководителем и соавторами научных публикаций.

#### Содержание диссертации

Во введении дается обоснование актуальности темы диссертационной работы, формулируются ее цели и задачи. Определяются объект и предмет исследования, приводятся методы исследования. Показывается связь работы с

научными планами, программами, темами. Раскрываются научная новизна полученных данных и научно-практическая значимость исследований. Формулируются положения, выносимые на защиту. Приводится список научных семинаров, конференций, на которых были апробированы основные положения диссертации. Представляются сведения о научных публикациях соискателя. Определяется личный вклад соискателя. Дается краткое описание структуры и содержания диссертационной работы.

В первом разделе рассматривается история проведения гидрооптических исследований в Черном море. Обсуждаются основные известные особенности в пространственном распределении гидрооптических параметров в глубоководной части Черного моря и прибрежных районах Крыма.

Во втором разделе приводятся краткая характеристика районов исследования, объем полученных данных, метод проведения измерений. Дается подробное описание разработанных инструментальных средств, с помощью которых был получен материал для реализации целей и задач, поставленных соискателем.

Третий раздел посвящен анализу результатов крупномасштабных гидрооптических исследований, выполненных соискателем в северной части Черного моря в рейсах на НИС «Профессор Водяницкий» в период с 2015 по 2019 гг. Описаны особенности формирования поля общего взвешенного вещества в различные сезоны и в отдельные годы. Показана связь распределения общего взвешенного вещества с термохалинной структурой и динамикой вод.

В разделе представлены результаты гидрооптических четвертом исследований в Голубой бухте (Севастополь) и заливе Сиваш. Показано сильное антропогенное воздействие на акваторию Голубой бухты, изучены его горизонтальные масштабы, вертикальная структура. Описаны особенности изменений концентрации взвешенного вещества в заливе Сиваш в условиях роста солености. Проанализированы корреляционные связи между

распределениями общего взвешенного вещества и соленостью, ветром, характеристиками мейобентоса в заливе Сиваш.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

#### Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность д-ру физ.-мат. наук Ли М.Е. (ФГБУН ФИЦ МГИ) И научному руководителю д-ру геогр. наук Артамонову Ю.В. (ФГБУН ФИЦ МГИ) за неоценимую помощь и ценные советы при подготовке работы. Автор искренне признателен канд. геогр. наук Скрипалевой Е.А. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. физ.-мат. наук Алексееву Д.В. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. техн. наук Морозову А.Н. (ФГБУН ФИЦ МГИ), дру геогр. наук Васечкиной Е.Ф. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. биол. наук Шадрину Н.В. (ФИЦ ИнБЮМ), м.н.с. Федирко А.В. (ФГБУН ФИЦ МГИ), чл.корр. РАН, д-ру геогр. наук Коновалову С.К. (ФГБУН ФИЦ МГИ), академику РАН Бондуру В.Г. (НИИ «АЭРОКОСМОС»), д-ру геогр. наук Совге Е.Е. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. техн. наук Мартынову О.В. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. техн. наук Чепыженко А.И. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. физ.-мат. наук Корчемкиной Е.Н. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. физ.-мат. наук Суслину В.В. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. физ.-мат. наук Кубрякову А.А. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. биол. наук Колесниковой Е.А. (ФИЦ ИнБЮМ), канд. физ.-мат. наук Пономореву В.И. (ТОИ ДВО РАН), канд. геогр. наук Шокуровой И.Г. (ФГБУН ФИЦ МГИ), д-ру биол. наук Празукину А.В. (ФИЦ ИнБЮМ), м.н.с. Кудинову О.Б. (ФГБУН ФИЦ МГИ), д-ру геогр. наук Ломакину П.Д. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. геогр. наук Ореховой Н.А. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. геогр. Гармашову А.В. (ФГБУН ФИЦ МГИ), наук канд. физ.-мат. наук Станичному С.В. (ФГБУН ФИЦ МГИ), н.с. Овсяному Е.И. (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. физ.-мат. наук Салюку П.А. (ТОИ ДВО РАН), канд. биол. наук Ануфриевой Е.В. (ФИЦ ИнБЮМ), канд. геогр. наук Ереминой Е.С. (ФГБУН ФИЦ МГИ), за плодотворные дискуссии и поддержку на разных этапах выполнения работы.

# Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Рукопись содержит 186 страниц, 73 рисунка и 13 таблиц, список литературы из 156 наименований.

# РАЗДЕЛ 1 ИЗУЧЕННОСТЬ ГИДРООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ

## 1.1 Гидрооптические исследования в Черном море

В истории натурных гидрооптических исследований вод Черного моря можно выделить четыре основных периода:

- начальный период: 1922–1960 гг.;
- период интенсивных исследований: 1960-е середина 1990-х гг.;
- период застоя: вторая половина 1990-х 2000-е гг.;
- современный период: с 2015 г.

### 1.2 Гидрооптические исследования в период: 1922 г. – 1960 г.

Первые гидрооптические исследования Черного моря были выполнены в 1922 г. в рамках Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции Всесоюзного научно-исследовательского института (ВНИИ) морского рыбного хозяйства под руководством профессора Н.М. Книповича, в которой особое внимание уделялось измерениям прозрачности вод [28, 29]. Вплоть до 60-х годов XX века периодические гидрооптические исследования в Черном море ограничивались только измерениями относительной прозрачности вод при помощи белого диска Секки (измерялась глубина видимости стандартного белого диска диаметром 30 см ( $Z_6$ ) [30]), которые выполнялись, в основном, Гидрометеослужбой И научно-исследовательскими институтами, занимающимися изучением Черного моря. В работах [31, 32, 54, 55] обобщены все имеющиеся данные по глубине видимости белого диска за этот период и по ним рассчитаны среднегодовые величины для глубоководной части Черного моря за изобатой 1000 м (таблица 1.1). Всего, за период 1922–1960 гг. в Черном море было выполнено 2192 измерения относительной прозрачности, а в глубоководной его части всего 165 измерений. В работах при расчете

среднегодовых значений  $Z_6$  учитывалась сезонная изменчивость прозрачности воды. Для этого величины  $Z_6$  умножались на коэффициент сезонной изменчивости, представляющий собой отношение среднемноголетнего значения  $Z_6$  в рассматриваемом районе за весь период наблюдений к среднемноголетнему значению  $Z_6$  для данного месяца.

Таблица 1.1 – Глубина видимости белого диска для глубоководной части Черного моря

Год	Среднегодовые	Минимальные	Максимальные	Количество
	величины Z <sub>б</sub>	величины $Z_{\delta}$	величины Z <sub>б</sub>	наблюдений
1923	18,5	17,3	21,0	5
1924	19,6	13,6	26,2	21
1925	19,2	10,2	33,3	30
1927	20,8	16,0	25,1	10
1937	12,5	9,1	20,6	4
1938	14,9	12,0	17,9	2
1953	15,8	14,8	17,7	5
1955	12,7	7,0	17,6	4
1956	13,6	8,0	20,0	10
1957	18,2	12,2	24,3	38
1958	17,7	6,1	27,4	25
1960	16,8	13,9	19,4	11

На рисунке 1.1 представлена межгодовая изменчивость прозрачности воды в глубоководной части Черного моря за период 1923–1960 гг. Показано, что наиболее высокие среднегодовые значения Z<sub>6</sub> (18,5–20,8 м) наблюдались в глубоководной части моря в 1920-е гг., причем в апреле 1925 г. максимальная глубина видимости белого диска составила 33,3 м (в точке 42°39' с.ш., 33°30' в.д.) [55], что является максимальной величиной за все время наблюдений относительной прозрачности в Черном море. В 1930-е гг. по единичным измерениям отмечалось понижение среднегодовых величин Z<sub>6</sub> (12,5–15 м). 1940-е гг. В измерения относительной прозрачности В глубоководной части Черного моря не проводились. В 1950-е гг. отмечалось изменение относительной прозрачности в Черном море в пределах 12,7–18,2 м.

В целом, многие исследователи [31, 32, 54] характеризовали оптическое состояние Черного моря в данный период времени 1923–1960 гг. как квазистабильное.



Рисунок 1.1 – Межгодовая изменчивость прозрачности воды в глубоководной части Черного моря за период 1923–1960 гг.

#### 1.3 Гидрооптические исследования в период: 1960-е. – середина 1990-х гг.

1.3.1 Создание новой аппаратуры и развитие методов гидрооптических исследований. С 60-х годов XX века началось активное создание в МГИ АН УССР, СКТБ МГИ, ИО АН СССР гидрооптической аппаратуры, включающей подводные измерители показателя ослабления направленного света (прозрачномеры), измерители индикатрисы рассеяния света (нефелометры), измерители спектрального коэффициента яркости моря и подводной облученности. В Черном море с использованием разработанной

аппаратуры стали проводиться как крупномасштабные гидрооптические исследования с научно-исследовательских судов (НИС), так и прибрежные исследования с маломерных катеров. Набор измеряемых параметров охватывал как первичные гидрооптические характеристики (показатели ослабления, рассеяния, поглощения света и индикатрису рассеяния), так и характеристики (подводная облученность, коэффициент яркости моря). светового поля Основные данные об оптических характеристиках Черного моря были получены в период с 1970-х гг. до середины 1990-х гг. в судовых экспедициях, Морским гидрофизическим проводимых институтом И Институтом океанологии [56]. Важную роль в активизации судовых гидрооптических исследований в этот период сыграло и создание первых инструментальных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Искусственные спутники Земли (ИСЗ) стали оснащаться космическими сканерами видимого, инфракрасного (ИК) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазонов (одни из первых в СССР – ИСЗ «Космос–1076» (1979 г.), ИСЗ «Космос–1151» (1980 г.), «Космос– 1500» (1983 г.), «Космос-1870» (1987 г.)). ИСЗ стали результатом работы многих организаций и ведомств (в том числе АН УССР (МГИ АН УССР), АН СССР (ИКИ АН СССР и многих других), многих КБ (КБ «Южное», СКТБ МГИ и другие). Работы были ориентированы на выполнение, как методических работ, так и работ по исследованию морской поверхности, способов получения обработки больших объемов информации, разработки алгоритмов и И практического разнообразных использования данных ДЛЯ решения фундаментальных и прикладных задач в области физики моря, морской гидробиологии и экологии [57-60].

Благодаря большому объему проводимых гидрооптических исследований в Черном море, в этот период был достигнут значительный прогресс в понимании особенностей пространственного (вертикального и горизонтального) распределения гидрооптических параметров в различные сезоны и года. Одним из основных изучаемых гидрооптических параметров, помимо относительной прозрачности, является показатель ослабления

направленного света (ПОС – прозрачность) [56]. В Морском гидрофизическом институте РАН широко применялись и применяются методы и аппаратура для измерений показателя ослабления направленного света, которые в течение многих лет используются при проведении натурных гидрооптических исследований. По определению, показатель ослабления направленного света представляет собой сумму показателей поглощения и рассеяния и содержит в себе информацию об особенностях проявления этих процессов в различных водах [34]. Прозрачность воды обусловлена наличием в водной среде взвешенных частиц (глина, ИЛ, мелкодисперсные органические И неорганические вещества) и растворенной органики (желтое вещество) [4]. ПОС является оптическим индикатором содержания В водной среде рассеивающей и поглощающей свет взвеси.

Измерения ПОС выполнялись во многих научно-исследовательских рейсах, проводимых в Черном море. В таблице 1.2 [56] представлена информация о рейсах МГИ за девятилетний период (1978–1986 гг.), в которых проводились активные измерения ПОС в глубоководной части Черного моря. Измерения проводились прозрачномерами ЛФП, ЛУЧ, АКП, БИТИП и др. В общей сложности, за этот период было выполнено порядка 500 станций.

Таблица 1.2 – Временной массив измерений ПОС в глубоководной части Черного моря

Рейс	Период рейса
35 рейс НИС «Михаил Ломоносов»	25.07-21.08.1978 г.
23 рейс НИС «Академик Вернадский»	05.11-04.12.1980 г.
27 рейс НИС «Академик Вернадский»	25.05-06.06.1983 г.
28 рейс НИС «Академик Вернадский»	29.11–14.12.1983 г.
29 рейс НИС «Академик Вернадский»	15.05–15.07.1984 г.
43 рейс НИС «Михаил Ломоносов» (1 этап)	26.10–17.11.1984 г.
44 рейс НИС «Михаил Ломоносов» (1 этап)	09.06–09.07.1985 г.
44 рейс НИС «Михаил Ломоносов» (4 этап)	12.10–29.10.1985 г.
34 рейс НИС «Академик Вернадский»	16.06–10.07.1986 г.
14 рейс НИС «Профессор Колесников»	22.11–12.12.1986 г.

1.3.2 Результаты исследований.

1.3.2.1 Исследование ослабления распределений показателя направленного света. Результаты исследований показателя ослабления направленного света были опубликованы во многих работах [11, 36, 41, 56, 61]. Наиболее полные обобщения этих исследований рассмотрены в трудах, опубликованных Маньковским В.И. [36] и Прохоренко Ю.А. [56], в которых подробно рассмотрены горизонтальные И вертикальные особенности распределения показателя ослабления направленного света в Черном море. Ниже рассмотрим основные особенности распределений показателя ослабления направленного света для Черного моря, полученные в период 1960-х – первая половина 1990-х гг.

**1.3.2.2 Вертикальное распределение показателя ослабления направленного света в Черном море.** Маньковским В.И. [36] в вертикальном распределении ПОС глубоководной части моря было выделено четыре основных слоя, которые характеризуются собственными особенностями в распределениях гидрологических, химических и биологических характеристик: поверхностный, промежуточный, пограничный и глубинный (рисунок 1.2).

Согласно [36], поверхностный слой располагается в фотической зоне море, нижняя граница которого в среднем колеблется в пределах 40 – 70 м [11, 70]. В глубоководной части моря этот слой характеризуется наличием нескольких максимумов в вертикальном распределении ПОС в летний период. Основные максимумы наблюдались в сезонном термоклине и в верхней части постоянного галоклина. В шельфовой части моря, ввиду малых глубин, сезонный термоклин и постоянный галоклин совпадали по глубине, поэтому в вертикальном распределении в фотическом слое глубоководной части моря связано с увеличением содержания фитопланктона над слоями повышенных градиентов плотности. В зимний период, ввиду отсутствия сезонного термоклина, в поверхностном слое глубоководной части моря мог наблюдаться один максимум. А в шельфовой зоне, в основном,

вертикальное распределение имело однородную стратификацию. Более сложное вертикальное распределение в поверхностном слое наблюдалось в районах выхода береговых стоков (речных, антропогенных, дождевых).



Рисунок 1.2 – Типичное вертикальное распределение показателя ослабления направленного света (λ = 426 нм) и гидрологических характеристик летом в глубоководной части Черного моря: *E* – показатель ослабления направленного света; *T* – температура; *S* – соленость. Римскими цифрами обозначены: I – поверхностный, II – промежуточный, III – пограничный, IV – глубинный слои [36]

Промежуточный слой, согласно [36], отличался высокой прозрачностью вод и располагался на глубинах 50–150 м. Толщина его летом не превышала 30 м, в то время как зимой толщина могла увеличиваться до 80 м. Считается, что высокая прозрачность воды в этом слое связана с отсутствием здесь источников органической взвеси.

Пограничный слой автор работы [36] выделил в области перехода кислородной зоны в сероводородную. В начале 60-х гг. было обнаружено увеличение мутности в этом слое. В вертикальном распределении ПОС здесь наблюдалось наличие одного или нескольких максимумов с высокими значениями. Изучению этого слоя мутности большое внимание уделялось многими исследователями, результаты опубликованы во многочисленных работах [11, 71–78]. Наличие мутного слоя связано с высоким содержанием взвешенных частиц, 93% которых приходится на неорганическую взвесь, а 7% на органическую [78]. Согласно [71, 72], глубинный слой мутности содержит остатки жизнедеятельности фитопланктона и зоопланктона, живущих в верхнем слое моря. Также в пробах воды, взятых из этого слоя, обнаруживается органический углерод [79. 80] И радиоактивные [81]. элементы подтверждающие биологическую составляющую взвеси в слое мутности.

Как известно, основными процессами, протекающими в субкислородной зоне, являются окислительно-восстановительные реакции на основе цикла марганца и железа [82, 83]. В работе [36] одной из основных причин образования неорганической взвеси в пограничном слое считается окисление марганца и железа, поступающих в субкислородную зону, в результате чего образуется взвесь окислов марганца и железа.

В глубинном слое [84, 85], который начинается с верхней границы сероводородной зоны, вертикальное распределение ПОС характеризуется монотонным возрастанием с глубиной только в коротковолновой области спектра, что объясняется постепенным осаждением растворенной органики.

1.3.2.3 Горизонтальное ослабления распределение показателя направленного света в Черном море. Помимо изучения особенностей стратификации ПОС Черном вертикальной в море исследовались крупномасштабные И мезомасштабные особенности горизонтального [36, распределения прозрачности. Согласно 86], горизонтальном В

распределении ПОС в поверхностном слое (до глубин ~ 25 м) Черного моря наиболее мутные воды наблюдались в летний и зимний сезоны на северозападном шельфе, что связано с выносом мутных пресных вод реками Днепр и Дунай (рисунок 1.3). Вовлекаясь в Основное черноморское течение (ОЧТ), эти воды распространялись на юг вдоль западного побережья моря примерно до 43°30' с.ш., постепенно трансформируясь в результате перемешивания с окружающими более прозрачными водами.

В поверхностном слое глубоководной части Черного моря особенно контрастные различия между западной и восточной частями моря наблюдались в летний период. Согласно [87, 88] они были связаны с более высокой продуктивностью вод на востоке за счет более интенсивного в этом районе вертикального обмена, сопровождающегося транспортом биогенных элементов из более глубоких слоев в фотическую зону. Более прозрачные воды в поверхностном слое до глубины примерно 100 м наблюдались в середине западного циклонического круговорота. При этом в зимний период здесь происходило увеличение прозрачности воды на поверхности и уменьшение прозрачности на глубине ~ 100 м [87]. Это обусловлено интенсивной зимней конвекцией, вызывающей более быстрый транспорт взвешенных частиц из поверхностного слоя в более глубокие слои, при котором частицы органического происхождения не успевают раствориться в поверхностном слое. Кроме того, зимой замедляются процессы растворения взвешенных частиц вследствие понижения температуры воды.





Рисунок 1.3 – Распределение показателя ослабления направленного света на λ = 422 нм, осредненного в слое 0-25 м для: а – летнего периода (июнь – сентябрь (1976–1985 гг.)); б – зимнего периода (ноябрь – декабрь (1976–1985 гг.)) [30]
По результатам предыдущих гидрооптических исследований в Черном море были также получены представления о синоптической структуре гидрооптических полей. Масштабы неоднородностей синоптических полей варьировали в пределах от 10 до 100 км [36] и характеризовались чередованием областей более прозрачных и более мутных вод. Такие неоднородности в гидрооптических полей горизонтальном распределении связаны С неравномерным распределением (фитопланктона) взвешенного И растворенного органического вещества В результате неоднородного распределения гидрологических, гидродинамических и гидрохимических Так, областях антициклонических круговоротов характеристик. В В поверхностном слое наблюдалась более прозрачная вода вследствие пониженного содержания в них биогенных элементов, необходимых для жизнедеятельности фитопланктона.

В работах [62, 64] представлены результаты исследований мезомасштабной структуры вод Черного моря. Данные исследования проводились при помощи буксируемого прозрачномера «БИТИП» на горизонте ~ 5 м. В результате исследований получены мезомасштабные особенности оптических неоднородностей для различных участков моря. Так показано, что размеры неоднородностей в районе северо-западного шельфа Черного моря варьировали в широких пределах: от 0,7 до 5 км. У южного берега Крыма – в диапазоне 5,5-6,5 км, а у берегов Кавказа достигали 9 км. Масштабы горизонтальных оптических неоднородностей в глубоководной части моря изменялись в диапазоне от 3,7 до 8 км.

В работах [55, 65, 66, 89, 90] подробно описаны особенности распределения взвешенного вещества и прозрачности воды на северо-западном шельфе Черного моря для различных сезонов. Показано, что распределение этих параметров определяется гидродинамическими процессами, условиями смешения речных и морских вод, а также зависит от продукционнодеструктивных процессов.

В прибрежных районах северной и западной частей шельфа, в связи с наличием существенного речного стока, во все сезоны наблюдается более низкая, по сравнению с другими районами, прозрачность воды с высоким содержанием взвешенных частиц. Зимой область влияния речных вод прижата к берегу и увеличивается весной с развитием полноводия. Весной содержание взвешенного вещества может увеличиваться на порядок по сравнению с зимой. В прибрежных районах северо-западной частей шельфа наблюдалась невысокая внутрисезонная и межгодовая изменчивость.

В центральной части шельфа было выявлено низкое содержание взвешенных частиц зимой, ранней весной и осенью, сопоставимое с их концентрациями в открытой части моря. В весенне-летний период в этом районе наблюдалась изменчивость размеров ЗОНЫ влияния речных трансформированных вод, обусловливающая более высокую внутригодовую и межгодовую изменчивость прозрачности и содержания взвешенного вещества по сравнению с устьевыми прибрежными районами. Увеличение мутности и содержания взвешенного вещества связаны, в основном, с развитием фитопланктона обогащенных биогенными В ЭТИХ элементами трансформированных речных водах [91, 92].

Ближе к свалу глубин характерна слабо выраженная внутрисезонная и существенная межгодовая изменчивость прозрачности воды, подобно изменчивости прозрачности вод открытой части моря.

**1.3.2.4 Межгодовая изменчивость относительной прозрачности в глубоководной части Черного моря по данным измерений с 1960–1995 гг.** Помимо использования гидрооптических приборов в черноморских рейсах в рассматриваемый период велись регулярные наблюдения за глубиной видимости белого диска. Всего за период с 1960–1995 гг. в Черном море было выполнено 33164 измерения относительной прозрачности воды, из них в глубоководной части – 1427 (таблица 1.3).

Год	Среднегодовые	Минимальные	Максимальные	Количество		
	величины Z <sub>б</sub>	величины Z <sub>б</sub>	величины Z <sub>б</sub>	наблюдений		
1961	17,7	14,1	24,3	14		
1962	21,3	13,6	33,2	12		
1963	16,2	11,4	21,5	16		
1964	17,0	3,4	25,0	33		
1965	14,5	9,1	20,7	15		
1966	15,7	11,1	22,1	14		
1967	16,0	10,9	20,9	4		
1968	16,5	8,3	23,6	5		
1969	14,0	10,6	16,7	6		
1970	17,8	7,7	21,9	6		
1972	18,1	11,7	25,0	21		
1973	14,9	7,7	18,5	7		
1974	18,9	15,2	24,8	17		
1975	17,6	9,0	21,9	72		
1976	13,7	7,6	23,0	5		
1978	16,4	12,7	20,9	23		
1979	17,6	12,0	20,1	4		
1980	16,2	9,0	20,5	18		
1981	14,7	4,1	26,6	29		
1982	16,4	10,0	27,0	45		
1983	14,5	8,7	20,6	25		
1984	14,7	5,1	22,1	149		
1985	14,5	6,1	26,5	56		
1986	16,0	6,1	23,5	19		
1987	12,3	7,0	22,6	87		
1988	13,2	1,0	23,0	73		
1989	13,3	1,8	29,9	198		
1990	7,5	2,7	13,0	101		
1991	8,4	5,1	12,9	116		
1992	6,2	2,0	11,0	72		
1993	10.8	5.4	18.5	108		
1994	14.0	9.1	17.5	44		
1995	17.7	8.6	26.5	13		

Таблица 1.3 – Глубина видимости белого диска для глубоководной части Черного моря

Анализируя межгодовую изменчивость относительный прозрачности в глубоководной части Черного моря (рисунок 1.4) в рассматриваемый период можно отметить, что до 1986 г Z<sub>6</sub> колебалась в пределах 12,7–21,3 м при

средних величинах 16–17 м, что соответствует величинам, наблюдаемым в предыдущие годы. Соответственно данный временной период можно, также как и период 1920–1960 гг., характеризовать как стабильный.



Рисунок 1.4 – Межгодовая изменчивость прозрачности воды в глубоководной части Черного моря за период 1961–1995 гг.

После 1986 г. наблюдалась тенденция резкого уменьшения прозрачности воды в Черном море на межгодовом масштабе. Наиболее явно это проявлялось в глубоководной части, что связано с перестройкой в море планктонного сообщества, оказавшей существенное влияние на его гидрооптические свойства [93]. В 1992 г. наблюдалась минимальная среднегодовая прозрачность воды (6,2 м) за все время наблюдений. Однако после 1992 г. процесс пошел в обратную сторону, и уже в 1995 г среднегодовая прозрачность воды была 17,7 м, таким образом, достигнув среднего уровня, существовавшего до 80-х годов.

### 1.4 Гидрооптические исследования во второй половине 1990-х – 2000-х гг.

Начиная со второй половины 1990-х гг., в связи с тяжелой экономической ситуацией стране, крупномасштабные исследования В Черного моря существенно сократились, а к концу 1990-х гг. совсем прекратились. Улучшение ситуации началось В 2010 г. после восстановления НИС «Профессор Водяницкий». Однако, с этого года и вплоть до 2015 г. исследования Черного моря ограничивались лишь эпизодическими съемками, проводимыми Морским гидрофизическим институтом на НИС «Профессор Водяницкий» в основном в районе северо-западного шельфа Черного моря.

Ограничение финансирования крупномасштабных экспедиционных исследований в открытом море активизировало менее затратные прибрежные гидрооптические исследования. В этот период исследователями [37-44], изучались особенности гидрооптической структуры В акваториях Севастопольских бухт, южного берега Крыма, Феодосийского залива. Керченского пролива. К наиболее изученным акваториям можно отнести Севастопольскую бухту, Балаклавскую бухту, Керченский пролив, Голубой залив.

В работах [37, 45, 46] подробно описаны результаты комплексных многолетних исследований Балаклавской бухты. В частности, показано, что наиболее мутные, загрязненные воды локализованы в мелководных участках бухты, в которых наблюдается слабый водообмен наряду с поступлением сточных и ливневых вод. Еще один замутненный участок бухты расположен ближе к выходу из бухты у юго-восточного побережья. Здесь наблюдалось увеличение мутности на порядок и более по сравнению с фоновыми водами открытой части моря, при этом максимальная мутность была выявлена на поверхности. Увеличение мутности здесь связано с выбросом загрязняющих веществ канализационного коллектора. Загрязняющие ИЗ вещества, переносимые течениями, поступают как в саму бухту, так и выносятся за ее пределы и нередко охватывают всю водную толщу.

В акватории Севастопольской бухты гидрооптические исследования проводились в основном Чепыженко А.И., Маньковским В.И. и охватывали разные годы и сезоны [39, 44]. Полученные данные позволили выделить ряд гидрооптических распределении закономерностей В характеристик, В частности, показателя ослабления направленного света и рассчитанным по его величинам концентрациям общего взвешенного вещества на акватории бухты. Так, в работах [39, 44] показано, что увеличение значений ПОС и содержания взвешенных частиц В поверхностном слое происходит В восточном направлении, к устью реки Черная. Вероятно, именно река Черная играет ключевую роль в процессе поступления и распределения взвешенного вещества на акваторию Севастопольской бухты. В целом, как показано в работе [44], распределение концентрации общего взвешенного вещества в каждом конкретном случае в верхнем слое Севастопольской бухты определяется локальной циркуляцией вод, которая, в свою очередь, определяется ветровыми Так, условиями. например, при западных и северо-западных ветрах наблюдаются активное поступление более прозрачных вод в Севастопольскую бухту из открытых участков моря. Помимо основных закономерностей в распределении исследованных характеристик наблюдаются локальные области с высокими значениями ПОС. Высокие значения регистрируются и в местах наиболее активного техногенного и антропогенного воздействия.

Также в работе [44] дается описание особенностей формирования гидрооптической структуры в Голубом заливе, расположенном вблизи южного берега Крыма. Проведенные исследования позволили выявить источники поступления взвешенных веществ антропогенного происхождения и закономерности их распределения по акватории. Получено, что основным источником загрязнения акватории служат сточные воды поселка Кацивели, количество которых заметно увеличивается после обильных дождей. Еще одним существенным источником загрязнения акватории является «Аквапарк», негативное влияние которого на прилегающую акваторию особенно четко проявляется летом в период его функционирования.

Помимо перечисленных прибрежных акваторий Крыма, гидрооптические исследования выполнялись и в других акваториях, но, в основном, для этих акваторий измерения были эпизодическими и полученной информации пока недостаточно для выявления закономерностей в формировании гидрооптической структуры.

#### Выводы к разделу 1

Анализ литературных источников показал, что в глубоководной части моря выделяется четыре слоя, которые характеризуются собственными особенностями в распределениях гидрооптических, гидрологических, химических и биологических характеристик: поверхностный, промежуточный, пограничный и глубинный.

Показано, что наиболее мутные воды наблюдались в летний и зимний сезоны на северо-западном шельфе. Выявлено также, что в глубоководной части моря более высокие значения ПОС отмечаются в восточной части в летний период, где наблюдается более высокая биологическая продуктивностью вод.

Приведены оценки межгодовой изменчивости относительной прозрачности. Показано, что в период с конца 1980-х и до начала 1990-х гг. отмечалось ее заметное уменьшение в Черном море.

Несмотря на достаточно продолжительный период, в течение которого проводятся гидрооптические исследования в Черном море (с 1920-х гг.), основной массив гидрооптических натурных данных получен в период 1970–1990 гг. За этот период получены общие представления об изменчивости гидрооптической структуры Черного моря в различные сезоны и годы. Однако для понимания деталей изменчивости гидрооптических полей на различных пространственно-временных масштабах необходимо проведение регулярных измерений с достаточно высоким пространственным разрешением современными техническими средствами [11]. При этом важен комплексный

подход, который должен включать в себя совместный анализ гидрооптических, гидрологических и биологических измерений in situ с привлечением спутниковых данных.

# РАЗДЕЛ 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

## 2.1 Методы и средства исследования

2.1.1 Спектральные измерители показателя ослабления направленного света СИПО4 и СИПО9.

2.1.1.1 Используемые в работе измерители показателя ослабления направленного света.

Натурные гидрооптические исследования в экспедициях выполнялись с использованием двух измерителей показателя ослабления направленного света, разработанных в отделе оптики и биофизики моря ФГБУН ФИЦ МГИ, которые позволяют проводить измерения в 4-х спектральных каналах (измеритель СИПО4) и в 9-ти спектральных каналах (измеритель СИПО9) [11, 47] (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Внешний вид измерителя СИПО

**2.1.1.2 Методологическая основа измерителей показателя ослабления направленного света.** При проведении измерений показателя ослабления направленного света в Черном море использовались и используются различные модификации измерителей прозрачности.

Измерение спектрального показателя ослабления направленного света водной средой основано на использовании базисного метода и закона Бугера.

Сущность базисных методов заключается в определении ослабления направленного пучка света, проходящего в среде определенное расстояние, задаваемое оптической базой прибора [34, 94]. Приборы, основанные на этом методе, относятся к классу фотометров. В этих приборах измеряется световой поток, прошедший через слой воды определенной толщины (*l*)

$$F_{\rm измер.} = F_{\rm опорн.} \times e^{-\varepsilon \times l}, \qquad (2.1)$$

где F<sub>измер.</sub> – световой поток, прошедший через слой водной среды;

F<sub>опорн.</sub> – световой поток, не ослабленный водной средой;

 $\varepsilon$  – показатель ослабления, м<sup>-1</sup>;

1-толщина слоя ослабления, м.

Показатель ослабления направленного света определяется из выражения (2.1)

$$\varepsilon = (1/l) \times Ln(F_{onoph}/F_{u_{3Mep}}).$$
(2.2)

Таким образом, зная длину базы и измерив входящий и выходящий из ослабляющей среды световые потоки, можно определить показатель ослабления.

Использование базисного метода позволяет достичь высокой точности измерений, измерения могут осуществляться на любых глубинах с высокой дискретностью по глубине, что позволяет детально изучить оптическую структуру вод исследуемых районов. Измерения прозрачномерами широко применяются для экспрессного определения вертикальной стратификации, положения оптических светорассеивающих слоев, определения взвеси и скоплений планктона, идентификации водных масс и для решения многих других задач океанологии.

По общим ослабления признакам все измерители показателя направленного света можно разделить на два типа: однолучевые и двухлучевые. В первом типе световая характеристика приемника излучения используется как фотометрическая и к ней предъявляются очень высокие линейности и стабильности. Однолучевые требования ПО фотометры применяются в простых прозрачномерах с невысокой точностью измерений [34]. В фотометрах второго типа фотоприемник используется для сравнения двух световых потоков: потока, ослабленного средой, и опорного. Временная и нестабильность источника излучения и фотоприемника, температурная приводящая, соответственно, к изменениям интенсивности излучения и фотоприемника, чувствительности вызывает изменение электрических сигналов на выходе фотоприемника, пропорциональное интенсивности двух световых потоков. При этом их отношение остается постоянным. Двухлучевые фотометры позволяют достичь высокой точности измерений.

Ведущими организациями, в которых разрабатывались измерители показателя ослабления направленного света в СССР, были: Морской гидрофизический институт, специализированное конструкторскотехнологическое бюро Морского гидрофизического института и Институт океанологии им. П.П. Ширшова. Также гидрооптическую аппаратуру разрабатывали в Лимнологическом институте Сибирского отделения.

Следует также отметить, что параллельно с развитием измерителей ПОС в СССР, а впоследствии и в странах СНГ, происходило их развитие и за рубежом. В настоящее время, одной из ведущих зарубежных компаний, занимающихся разработкой аппаратуры для подспутникового обеспечения, в частности измерителей ослабления света, является компания WETLabs (https://www.seabird.com), расположенная в США. К наиболее

распространенным измерителям показателя ослабления направленного света, разработанных компанией WETLabs, можно отнести C-Star (CST), c-Rover, AC-9, AC-S.

Важным моментом при разработке измерителей ПОС является учет влияния дестабилизирующих факторов, а именно:

– засветка в верхних слоях солнечным излучением (суммирование измерительного сигнала с посторонней засветкой). Для уменьшения влияния засветки ставят бленды, световые ловушки. Также в некоторых приборах использовалась модуляция светового потока. Зная частотно-фазовые характеристики модулирующего сигнала, по результирующему сигналу отсеивали постороннюю засветку;

 – засветка за счет рассеяния на оптических деталях в пути измерительного канала. Для уменьшения вклада, детали внутри корпуса необходимо зачернить;

влияние деформации (в основном появляется на больших глубинах).
 При деформации изменяется геометрия различных оптических деталей.
 Обязательным условием является направленность выходящего пучка по нормали к плоскости иллюминатора;

 временная деградация и изменчивость спектральных свойств при изменении температуры светоизлучающих и регистрирующих элементов.

Для повышения точности и стабильности приборов, которые основаны на применении базисных измерения ослабления методов показателя направленного света, необходимо уменьшить влияние нестабильностей фотоэлектрической элементов схемы как схемотехнически, так И алгоритмически.

**2.1.1.3 Конструктивные особенности измерителей СИПО.** Для решения задач, поставленных автором, необходимо было создать измеритель показателя ослабления направленного света, который обладал бы высокой устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов и был бы компактным. При разработке измерителя была выбрана автоколлимационная

оптическая схема с триппель-призмой в качестве отражающего элемента и с изменяющейся базой [34]. При такой оптической схеме измеряемая среда заполняет пространство между иллюминатором И триппель-призмой, обладающей свойством в широких пределах, независимо от ее ориентации в пространстве, отражать излучение в направлении, строго противоположном падающему излучению. Ход лучей в такой автоколлимационной схеме при различных ориентациях призмы относительно оси измерительного пучка света не изменяется. Поэтому можно плавно изменять длину оптической базы прозрачномера простым перемещением или перестановкой призмы вдоль оси пучка, поскольку юстировка прибора при этом не нарушается. Следовательно, появляется возможность практически неограниченно расширять диапазон измерения показателя ослабления излучения, поскольку, даже в сильно отличающихся по своим оптическим свойствам средах, удается производить измерения В оптимальных условиях с одинаковой относительной погрешностью [34].

Измеритель состоит из герметичного контейнера, в нем расположена оптоэлектронная схема прибора. Контейнер снабжен выходным иллюминатором, перед которым на расстоянии 0,125 м на штангах закреплена отражающая триппель-призма.

Функциональная схема измерителя приведена на рисунке 2.2. На рисунке цифрой 1 обозначена светоделительная пластинка. Основные элементы функциональной схемы разделены на два канала – измерительный и опорный. Опорный канал содержит излучающий светодиод, выходную диафрагму, светоделительную пластину (1), прямоугольную призму, входную диафрагму, фотодиод опорного сигнала, усилитель опорного сигнала. Измерительный состоит излучающего светодиода, выходной диафрагмы, канал ИЗ светоделительной пластины, объектива-иллюминатора, триппель-призмы, входной диафрагмы, фотодиода измерительного сигнала, усилителя измерительного сигнала [95].



Рисунок 2.2 – Функциональная схема прозрачномера СИПО4

Свет светодиода светоделительной ОТ с помощью пластины, расположенной по ходу луча под углом 45°, расщепляется на два луча. Прошедший через светоделительную пластину измерительный луч, сформированный с помощью объектива-иллюминатора в параллельный пучок света, выходит в исследуемую среду. В среде измерительный луч проходит расстояние до триппель-призмы, отражается от нее, вновь проходит через измеряемую среду в обратном направлении и через тот же объективиллюминатор возвращается внутрь контейнера. Внутри герметичного контейнера ослабленный измеряемой средой отразившись свет, OT светоделительной пластины, фокусируется в центре измерительной диафрагмы

и далее падает на одну из светочувствительных площадок двухэлементного фотодиода. После усиления сигнал подается на вход коммутатора аналогоцифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера (МК) ADuC814.

Опорный луч формируется из той части света светодиода, которая отражается от светоделительной пластины. С помощью прямоугольной призмы опорный пучок света направляется непосредственно на другую светочувствительную площадку двухэлементного фотодиода.

Данный прибор обладает следующими специфическими особенностями:

а) в качестве источника излучения в измерители СИПО4 используется 4цветный сверхъяркий светодиод фирмы LEDENGIN (https://www.ledengin.com) с током питания 0,7 А, позволяющий измерять спектр в следующих спектральных каналах: 460 нм, 520 нм, 590 нм 625 нм. Преимущества использования таких светодиодов заключаются в следующим:

- световая отдача современных мощных сверхъярких светодиодов превосходит световую отдачу ламп накаливания. Предварительные расчеты показывают, что употребление в качестве источника света излучающего диода вместо лампы накаливания дает выигрыш по световому потоку в десятки раз, а в коротковолновой области спектра даже в сотни, что особенно важно при измерениях рассеяния и флуоресценции [95]. На рисунке 2.3 приведены нормированные спектры излучения галогенной лампы накаливания и типового набора светоизлучающих диодов фирмы Philips Lumileds Lighting Company (https://www.luxeon.com). На рисунке 2.3 видно, что спектральные интервалы излучения светодиодов распределены по всему диапазону видимого спектра. сравнительно узкие (15-35 нм), поэтому допустимо считать Интервалы светодиодов квазимонохроматическим. Таким образом, излучение при натурных исследованиях оптических свойств морских вод возможно отказаться от применения интерференционных светофильтров и, соответственно, от механизма их переключения, что удешевляет и упрощает конструкцию. Следует отметить, что стоимость одного сверхъяркого светодиода в 5–10 раз меньше, чем самого дешевого интерференционного светофильтра [95].

Для иллюстрации вышесказанного в таблице 2.1 приведены сравнительные характеристики галогенной лампы накаливания фирмы WelchAllyn мощностью 20 Вт и светодиодов фирмы Philips Lumileds Lighting Company (ток 700 мА, мощность рассеяния 3–4 Вт) [95].



Рисунок 2.3 – Нормированные спектры излучения галогенной лампы и типового набора светодиодов

– светодиоды обладают, при низким потреблении, высоким КПД преобразования электрической энергии в световую и длительным сроком службы (около 50 000 часов, в то время как срок службы лампы накаливания составляет 200 часов);

– являются надежными и не выделяют при работе вредных веществ.

Таблица 2.1 – Сравнительные характеристики галогенной лампы и светодиодов

Наименован									
ие	ие 450		505	530	590	615	626	Срок	
источника		службы, ч.							
света	Световой поток, лм								
Галогенная									
лампа	3*	1,0	4,5	9,5	8,2	5	3,5	200	
Светодиоды	400*	58	130	180	130	100	65	50000	
	-00	50	150	100	150	100	05	50000	

\* Величина потока излучения указана в милливаттах

 б) в измерителе с целью компенсации нестабильности свойств полупроводниковых светоизлучающих и приемных диодов применен двухлучевой принцип измерений.

в) автоколлимационная оптическая схема с триппель-призмой в качестве отражающего элемента минимизирует погрешности измерений, вызванные неточностями настройки и деформациями конструкции вследствие окружающего прибор внешнего давления [34, 94].

г) управление коммутатором для поочередного включения светодиодов, оцифровка аналоговых сигналов и формирование кадра в последовательном коде осуществляется микропроцессором [95].

д) измеритель возможно использовать в двух вариантах исполнения – кабельном и автономном. Причем изменение варианта исполнения осуществляется оперативно. При использовании измерителя в кабельном исполнении, управление им осуществляется при помощи персонального компьютера. Для перехода в автономное исполнение непосредственно к измерителю подключается компактный универсальный герметичный модуль, функционально осуществляющий накопление, индикацию данных, управление и питание зондирующего измерителя [96]. Для передачи данных по кабелю в бортовой компьютер или в накопитель уровни выходных сигналов микроконтроллера преобразуются в уровни стандарта RS-232C [95].

е) в измерителе предусмотрена возможность изменения оптической базы, что дает возможность расширять диапазон измерений показателя ослабления направленного света, а также облегчает проведение калибровки измерителя.

В таблице 2.2 представлены основные технические характеристики прозрачномера СИПО4.

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики измерителя СИПО4

Диапазон измерения показателя ослабления (ln)	0,01-5,0 м <sup>-1</sup>
Погрешность измерения показателя ослабления (ln)	+/- 0,015 м <sup>-1</sup>
Область спектральной чувствительности	460, 520, 590, 625 нм
Длина базы	0,125 м
Постоянная времени измерения показателя	
ослабления	0,1 c
Максимальная глубина погружения	250 м
Погрешность измерения глубины	+/- 0,5%
Связь с бортовым ноутбуком	4-х жильный кабель
Частота отсчетов	10 Гц
Источник питания	+ 12 - 18 B, 0,35 A
Габариты	Ø100 x 400 мм
Macca	3,5 кг

Следует отметить, что параллельно с измерителем СИПО4 нами был разработан практически идентичный измеритель СИПО9, отличающийся, в основном, исполнением узла осветителя. В измерителе СИПО9 был расширен спектральный диапазон до 9-ти участков спектра (370, 400, 447, 470, 505, 530, 590, 617 и 660 нм). Конструктивно, в отличие от СИПО4, в котором использовался 4-цветный светодиод, в измерителе СИПО9 использовались 9 отдельных светодиодов, располагающихся на диске, вращение которого осуществляется шаговым двигателем. Помимо явных преимуществ измерителя СИПО9 перед измерителем СИПО4, у него есть существенный недостаток, а именно частота проведения измерений. В связи с конструктивными особенностями, частота считывания данных в измерителе СИПО9 составляет 0,25 Гц, что ограничивает диапазон его использования, особенно в условиях, когда измерения необходимо выполнять в дрейфе судна. Однако, при хороших условиях измерений, его использование позволяет расширить представление о спектральных особенностях показателя ослабления направленного света.

2.1.1.4 Оценка стабильности определения показателя ослабления Применение измерителе СИПО4 направленного света. В четырех спектральных излучающих элементов потребовало проведение исследования по каждому излучателю ИХ стабильности (энергетической И спектрофотометрической) при воздействии дестабилизирующих факторов. При этом основным является исследование стабильности не только спектральной характеристики излучающих элементов, но и ее энергетических величин при изменении температурной и токовой характеристики. Эксперимент проводился над четырехцветным светодиодом фирмы LedEngin, который используется в вышеупомянутом измерителе. Конструктивно светодиод выполнен в виде подложки, на которой расположены четыре светоизлучающих чипа на расстоянии 0,25 мм друг от друга.

Для выполнения этих работ была разработана специальная экспериментальная установка, обеспечивающая термостатирование излучателей (рисунок 2.4).

В термостат 1, температура в котором обеспечивается водной средой – от +2°С (шуга) до +55°С, помещен радиатор 2, на надводной части которого расположена площадка со светоизлучателем 3. На площадке светоизлучателя находился датчик температуры, контролирующий температуру излучателя. Регистрация токового режима излучателей и его температуры проводилась непрерывно.

Исследования проводились поочередно над каждым из чипов. Диапазон изменения постоянного тока был выбран от 10 мА до 80 мА, а температурный – от 8°С до 50°С.

В ходе исследований было выявлено, что изменчивость характеристик светодиодов с различной длиной волны происходит по одним законам и

изменения наблюдаются примерно в одинаковых пределах. Поэтому в качестве иллюстрации приводятся данные только для красного элемента светодиодной сборки [97].



Рисунок 2.4 – Установка для исследования спектральных особенностей светодиодов

Результаты измерений показали, что при изменении величины постоянного тока спектральной изменчивости не наблюдается, меняется лишь интенсивность светового потока. На рисунке 2.5 показана спектральная изменчивость при изменении силы тока, измеренная при свечении красного светодиода.

Далее было проведено исследование с целью оценки влияния температуры излучателей на их спектральные свойства. В результате эксперимента было выявлено, что при увеличении температуры излучателя его спектральная характеристика смещается в длинноволновую область. На рисунке 2.6 показано смещение максимума излучения на 5 нм при изменении температуры кристалла [97].



Рисунок 2.5 – Зависимость длины волны от силы тока для красного светодиода при температуре 8°С



Рисунок 2.6 – Спектральное смещение максимума излучения красного светодиода при изменении температуры

Также было обнаружено, что изменение температуры влияет и на интенсивность светового потока. Увеличение температуры с 8°С до 50°С

вызывает уменьшение сигнала примерно на 35% (рисунок 2.7). Однако следует отметить, что в диапазоне 25–32°С наблюдается стабильный участок характеристики [97].



Рисунок 2.7 – Зависимость интенсивности светового потока от температуры для красного светодиода

Проведенные исследования подтвердили возможность применения светоизлучающих элементов в спектрофотометрических измерителях при условии учета спектральной вариации и изменения энергетических характеристик.

С целью компенсации погрешностей, обусловленных изменчивостью силы света, в приборе предусмотрена 2-х лучевая схема измерений. Влияние изменения длины волны излучения в диапазоне  $\pm 2\div3$  нм на измерения показателя ослабления направленного света незначительно, поскольку в природных водах не наблюдается узких локальных максимумов.

Результаты испытаний на временную стабильность в течение 2-х часов приведены на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Временная изменчивость показаний измерителя ПОС

После 10-ти минутного прогрева среднеквадратичное отклонение для всех каналов не превысило 0,5%.

2.1.1.5 Разработка программного обеспечения для приема информации, получаемой с измерителей. Первичная обработка информации, визуализация хода измерений в реальном режиме времени осуществляется персональным компьютером (ПК) с помощью программы, разработанной в среде LabVIEW (https://www.ni.com/ru-ru.html). Оцифровка аналоговых и согласование параметров цифровых сигналов производится с помощью АЦП микроконтроллера ADuC814 фирмы Analog Devices Ink.

Для считывания сигналов фотодиодов, датчиков опорного и измерительного каналов, положения нуля, использовались четыре аналоговых входа микроконтроллера. Для управления работой шагового двигателя, перемещающего диск со светодиодами – два разряда цифрового порта.

Программа реализована в программной среде LabVIEW с помощью функции последовательных фреймов, которые задают строгую последовательность исполнения блоков программы. Такое построение целесообразно для небольших по объему програм, и позволяет достичь решения поставленных задач с минимальными затратами времени на программирование.

**2.1.1.6 Методы градуировки измерителей.** Перед проведением градуировки измерителя СИПО4 была проверена линейность сквозной характеристики прибора на воздухе. Результаты проверки показаны на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Сквозная характеристика прибора для различных спектральных интервалов:  $a - \lambda = 625$  нм;  $6 - \lambda = 590$  нм;  $B - \lambda = 532$  нм;  $\Gamma - \lambda = 457$  нм

На приведенных графиках видно, что показания измерителя линейно связаны с искомой характеристикой среды с большой степенью точности. Следовательно, выходной сигнал измерителя можно выразить формулой

$$Y(\lambda) = S(\lambda) \times T(\lambda) \times F(\lambda), \qquad (2.3)$$

где Y( $\lambda$ ) – выходной сигнал фотометра в квантах;

S(λ) – коэффициент преобразования светового потока;

 $T(\lambda)$  – пропускание исследуемой среды;

F(λ) – световой поток осветителя.

Показатель ослабления направленного света для каждого участка спектра, рассчитываются по закону Бугера согласно формуле (2.2).

2.1.1.7 Валидация измерений разработанных Для измерителей. дополнительной оценки репрезентативности получаемых in-situ данных с использованием разработанных измерителей были проведены сравнения вертикальных профилей с подобными измерителями других производителей. В частности, в 79-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» параллельно с прозрачномером СИПО4 проводились измерения ПОС прозрачномером ПУМ-(разработка ИО РАН) в зеленом участке спектра (520 нм) и 200 откалиброванном также в м<sup>-1</sup>. В некоторых рейсах по Черному морю на НИС «Профессор Водяницкий», помимо измерений прозрачномером СИПО4, проводились измерения мутномерами зондирующих гидрофизических комплексов Idronaut И Кондор. Мутномеры упомянутых комплексов откалиброваны на растворах суспензии формазина в единицах мутности по формазину (ЕМФ). Несмотря на то, что описанные приборы имеют разные спектральные которых проводятся измерения, участки, на а также откалиброваны в разных единицах, особенности вертикального распределения, особенно в наиболее чистых, открытых районах моря, были подобными.

Сравнение вертикальных профилей, полученных измерителем СИПО4 совместно с другими измерителями представлено на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Вертикальные профили, полученных совместно измерителями: а – СИПО4 и мутномером гидрофизического комплекса Кондор; б – СИПО4 и мутномером гидрофизического комплекса Idronaut; в – СИПО4 и ПУМ-200.

2.1.1.8 Связь ослабления показателя направленного света С концентрацией взвеси. Важным компонентом мониторинга морских экосистем является оценка концентрации взвешенного в воде вещества. В природных водах во взвешенном состоянии находится большое количество минеральных и органических частиц. Общее взвешенное вещество включает в себя минеральную и органическую взвесь.

Существует тесная связь между ПОС и содержанием общего взвешенного в воде вещества [36, 98]. Корреляция между этими параметрами зависит от состава и свойств взвеси: размера, формы, показателя преломления частицы, цветового контраста И определяется региональными особенностями. акваторий Следовательно, различных регрессионные ДЛЯ уравнения связывающие ПОС и концентрацию общего взвешенного вещества могут существенно отличаться. Информативным участком спектра для определения

содержания взвешенного вещества с помощью измерителей ПОС является красная область спектра [99]. В частности, в настоящей работе соискателем уделяется основное внимание именно общему взвешенному веществу, подразумевая под ним измерения ПОС на длине волны 625 нм, пересчитанные в концентрацию ОВВ. Регрессионные уравнения, связывающие показатель ослабления направленного света в м<sup>-1</sup> с концентрацией общего взвешенного вещества в мг/л получают на основе массивов данных измерений ПОС и определений концентрации ОВВ гравиметрическим методом [11].

Сущность определения общего взвешенного вещества гравиметрическим методом заключается в следующем. Пробы воды известного объема, отобранные с выбранных горизонтов, фильтруются через предварительно подготовленные, согласно руководящему документу (РД) «Взвешенные вещества и общее содержание примесей в водах. Методика выполнения измерений массовой концентрации гравиметрическим методом РД 52.24.468-2005» [12], мембранные фильтры с диаметром поры 0,45 мкм при вакууме не более 0,25 атм. После чего фильтры высушивают при температуре порядка 150°С до достижения постоянного веса и взвешивают.

Массовая концентрация взвешенных веществ в воде (X, мг/л) рассчитывается по формуле:

$$X = ((m2 - m1) \times 1000)/V, \qquad (2.4)$$

где m1 – масса бюкса с мембранным фильтром без осадка, г;

m2 – масса бюкса с мембранным фильтром с осадком взвешенных веществ, г;

V – объем отфильтрованной пробы воды, л.

Следует отметить, что применение гравиметрического метода в соответствии с РД имеет ряд ограничений.

Во-первых, метод применим при концентрациях взвеси более 5 мг/л «Настоящий руководящий документ устанавливает методику выполнения

измерений (далее - методика) массовой концентрации взвешенных веществ (более 5 мг/дм<sup>3</sup>)». Диапазон измеряемых массовых концентраций составляет от 5 до 50 мг/л, при этом погрешность измерений составляет 4 мг/л, т.е. до 80% при измерении концентрации порядка 5 мг/л.

Во-вторых, метод является трудоемким и требует много времени для получения результата, соответственно не дает возможность проведения автоматизированного мониторинга.

При проведении гравиметрического анализа большое внимание необходимо уделять подготовке проб для получения репрезентативных данных. Для того чтобы избежать нерепрезентативной выборки или осаждения частиц, важно, чтобы проба в точке отбора была хорошо перемешана и соответствовала концентрациям в точке смешения при природных значениях скорости течения. При этом процент ошибки в значительной мере зависит от скорости течения и дисперсного состава взвеси.

Несмотря на перечисленные недостатки гравиметрического метода, его применяют для морских вод, с величинами концентраций взвешенного вещества существенно ниже 5 мг/л. При этом, чтобы сохранить органическую взвесь, которая является преобладающей в открытых районах моря, не сжигая ее, фильтры следует высушивать не при 150°С, а при 60°С. К тому же, ввиду трудоемкости гравиметрического метода, невозможно проведение большого количества определений, а также возникают сложности использования гравиметрического метода во многих экспедициях. За частую, при расчете концентрации взвеси по измерениям ПОС с использованием регрессионных уравнений, не учитываются региональные и сезонные особенности.

Ранее, в работах [36, 102] для вод открытой части Черного моря по результатам измерений ПОС на 660 нм была получена следующая зависимость:

$$C_{\text{obb}} = 3,45 \times \varepsilon_{660} - 0,52,$$

где С<sub>овв</sub> – концентрация общего взвешенного вещества, [мг/л];

ε<sub>660</sub> – показатель ослабления направленного света, [м<sup>-1</sup>], измеренный на 660 нм.

Подобная зависимость была получена ранее и для вод Севастопольской бухты по результатам исследований, проводимых в 2000–2001 гг.

$$C_{\text{OBB}} = 3,71 \times \varepsilon_{660} - 0,701.$$

Коэффициенты линейной корреляции варьировали в пределах 0,68–0,82 с данными прямых определений концентрации общего взвешенного вещества гравиметрическим методом [36].

В ходе проведенных соискателем исследований в северной части Черного моря и в заливе Сиваш были выявлены регрессионные соотношения связи показателя ослабления направленного света с концентрацией общего взвешенного вещества. В работе под концентрацией общего взвешенного вещества подразумеваются измеренные величины показателя ослабления направленного света, пересчитанные в весовые единицы по следующим полученным соотношениям:

– для открытой северной части Черного моря регрессионное соотношение (рисунок 2.11) [100] получено по результатам исследований (26 отборов проб, совпадающих с проведением зондирований СИПО4), выполненных в 101-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» совместно сотрудниками ИО РАН и соискателем.



Рисунок 2.11 – Зависимость концентрации ОВВ от ПОС на 625 нм для открытых районов северной части Черного моря

- для прибрежных акваторий Севастополя по результатам совместных исследований (отбор 11 проб воды в точках проведения зондирований СИПО9) соавтором и отделом «биогеохимии моря» ФГБУН ФИЦ МГИ, проведенных в 2014 г. получено регрессионное соотношение, представленное на рисунке 2.12) [101]. Полученное соотношение для прибрежных акваторий Севастополя несколько отличается от соотношения, полученного другими исследователями в начале 2000-х гг. Это связано с изменением антропогенного воздействия на прибрежные акватории, а также с особенностями метеорологического, гидрологического и гидродинамического режимов непосредственно в период проведения исследований (сгон, нагон, взмучивание взвеси различного происхождение, усиление, ослабление речных и прочих береговых стоков). Все эти факторы влияют на состав и свойства взвешенного в воде вещества и соответственно на регрессионное соотношение.



Рисунок 2.12 – Зависимость концентрации ОВВ от ПОС на 660 нм для прибрежных акваторий Севастополя

– для залива Сиваш, соискателем, совместно с сотрудниками ФГБУН
 ФИЦ ИнБЮМ, был проведен отбор 9 проб воды для определения концентраций
 ОВВ и измерений ПОС. В результате было получено регрессионное
 соотношение, приведенное на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Зависимость концентрации ОВВ от ПОС на 660 нм для залива Сиваш

# 2.2 Районы исследований, объем полученных данных и метод проведения измерений

2.2.1 Азово-Черноморский бассейн. Гидрооптическая структура вод Азово-Черноморского бассейна формируется под влиянием ряда факторов, основными из которых являются гидрометеорологический режим, орография района, развитие фитопланктонных сообществ и антропогенное воздействие. В различных районах моря влияние этих факторов не одинаково. В открытой части Черного моря преобладают природные факторы, связанные с развитием и жизнедеятельностью фитопланктона, а его пространственное распределение определяется гидрологическим режимом и динамикой вод. В прибрежных акваториях вследствие большого количества различных речных и прочих стоков Черное море подвержено высокой антропогенной нагрузке, которая существенное влияние на формирование гидрооптической оказывает структуры. В настоящее время интенсивное освоение шельфа, быстрый рост приморских городов, курортных объектов и массовая коттеджная застройка побережья приводят к значительному усилению антропогенных воздействий на экосистему этого региона [32, 102–107]. К тому же, ряд государств Европы сбрасывают В Черное море через Дунай, Прут, Днепр различные промышленные, сельскохозяйственные и бытовые загрязняющие вещества, в том числе биогенные элементы, органику, нефтепродукты [31].

Для комплексного изучения гидрооптической структуры Азово-Черноморского бассейна и уточнения факторов ее формирования на различных пространственно-временных масштабах важно проведение, как крупномасштабных исследований в бассейне, так и в его прибрежных акваториях, особенно наиболее изолированных от открытых участков.

В настоящей работе рассмотрены условия формирования полей общего взвешенного вещества в трех районах, принципиально отличающихся физикогеографическими особенностями и уровнем антропогенного воздействия: северная часть Черного моря, прибрежный участок Гераклейского полуострова и залив Сиваш. Ниже рассматриваются некоторые наиболее отличительные особенности этих регионов.

**2.2.2 Северная часть Черного моря.** Черное море – внутреннее море бассейна Атлантического океана. Оно омывает берега шести стран – Украины на северо-западе и России на севере и северо-востоке, Грузии на востоке, Турции на юге, Болгарии и Румынии на западе. Площадь Чёрного моря – 422 000 км<sup>2</sup> [108]. Очертания Чёрного моря напоминают овал с наибольшей осью около 1150 км. Наибольшая протяжённость моря с севера на юг – 580 км. Наибольшая глубина – 2210 м [108], средняя – 1240 м. Объём воды в море составляет 555 тыс. км<sup>3</sup> [109]. С севера в море глубоко врезается Крымский полуостров. Северная часть Черного моря характеризуется общирной шельфовой зоной на северо-западе, узким шельфом у южного берега Крыма и у берегов Кавказа.

В работе соискателя анализируются результаты крупномасштабных исследований, выполненные в рейсах на НИС «Профессор Водяницкий» в северной части Черного моря в период 2016–2020 гг. Исследования охватывали часть северо-западного шельфа, шельфовую зону вдоль Крымского побережья от м. Тарханкут до м. Опук, материковый склон вдоль Крыма и его глубоководную часть. Начиная с 2018 г. область исследований расширилась и стала охватывать прибрежную и глубоководную часть Кавказского побережья до границы с Абхазией. Схема расположения станций представлена на рисунке 2.14.



Рисунок 2.14 – Схема расположения станций в рейсах на НИС «Профессор Водяницкий»

За период с 2016 г. по 2020 г. крупномасштабные гидрооптические исследования были выполнены в десяти рейсах НИС «Профессор Водяницкий» [49, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117]. Практически на всех станциях проводились измерения ПОС при помощи измерителя СИПО4 автономного исполнения в зондирующим режиме. На каждой станции в течение 10 минут выполнялось зондирование ПОС до глубин ~ 200 м. Исследования проводились в различные периоды года, однако есть съемки, которые выполнялись На рисунке 2.15 практически В одинаковые сезоны. И В таблице 2.3 представлены периоды проведения съемок для всех годов, а также количество станций, на которых выполнялись измерения ПОС.

Месяц Год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2016												
2017												
2018											00	
2019												
2020					2				51 10			

Рисунок 2.15 – Периоды проведения исследований на НИС «Профессор Водяницкий»

Таблица 2.3 – Рейсы НИС «Профессор Водяницкий», в которых проводились измерения ПОС

№ рейса	Дата	Количество станций				
87	30.06-20.07.2016	106				
89	16.11-05.12.2016	112				
94	22.04-06.05.2017	104				
95	14.06-04.07.2017	113				
98	14.11-28.11.2017	90				
102	09.06-01.07.2018	122				
103	28.08-20.09.2018	147				
106	18.04–13.05.2019	142				
115	27.11–16.12.2020	76				
Общее количество станций, на которых выполнялись						
измерения ПОС 1012						

На некоторых станциях, где выполнялись измерения ПОС, дополнительно проводился отбор проб воды для дальнейшего определения содержания общего взвешенного вещества гравиметрическим методом.

При анализе данных гидрооптических исследований использовались гидрологические данные, данные инструментальных измерений течений и гидробиологические данные по исследованию микропланктона (концентрация хлорофилла-а, видовой состав и численность видов микропланктона). Гидрологические измерения выполнялись зондирующим СТD комплексом SeaBird-911 plus, скорость и направление течений измерялись профилографом течений ADCP WORKHORSE-300 kHz.

Для интерпретации результатов натурных исследований использовались также данные восходящей яркости моря на длине волны 555 нм (Rrs(555)), измеренные спутниковым сканером MODIS-Aqua. Среднесуточные данные 3-го уровня с пространственным разрешением 1 км скачивались из массива COPERNICUS (http://marine.copernicus.eu/interactive catalogue) за периоды съемок. Выбор этого параметра обусловлен тем, что восходящая яркость моря на длине волны 555 нм определяется в основном свойствами взвешенного вещества.

2.2.3 Прибрежный район Гераклейского полуострова. Кроме НИС крупномасштабных гидрооптических «Профессор съемок на Водяницкий», большой объем исследований был выполнен на НИС «Бирюза» на акватории вблизи Голубой бухты (Севастополь (рисунок 2.16, а)), которая располагается в юго-западной части Гераклейского полуострова и является открытой бухтой Севастополя. Несмотря на то, что бухта беспрепятственно сообщается с открытыми прибрежными водами Черного моря, она считается одной из наиболее загрязненных бухт Севастополя ввиду наличия сброса из основных городских канализационных очистных сооружений (КОС) «Южные». Аварийное состояние сбросовых устройств и самих КОС приводит к высокой антропогенной нагрузке в Голубой бухте и в прилегающих к ней акваториях. В настоящей работе рассматриваются результаты комплексных гидрофизических и гидрооптических исследований [51, 118, 119] в акватории бухты, которые проводились на протяжении 2015–2016 гг. На рисунке 2.16 представлена схема расположения станций В западной части Гераклейского полуострова (рисунок 2.16, б) с более подробной схемой в акватории, прилегающей к Голубой бухте (рисунок 2.16, в).




Объем выполненных исследований в 2015 г. в акватории Голубой бухты состоял из четырех экспедиций, проведенных в периоды: 28–30.07.2015; 31.07.2015; 09.09.2015 и 10.09.2015 г. В 2016 г. исследования включали две экспедиции: 20–21.05.2016 и 12–13.09.2016 г. (Таблица 2.4).

Для согласования дистанционных данных с данными контактных измерений в исследованиях применялся измеритель показателя ослабления направленного света СИПО9 с расширенным спектральным диапазоном. Измерения спектров ПОС проводились с борта малотоннажного судна «Бирюза» на каждой станции в зондирующим режиме. Спектральный измеритель опускался на кабеле вручную с шагом 1 м по вертикали. Время выполнения шага составляло около 0,5 мин. Данные с измерителя выводились в онлайн режиме на монитор с целью возможности обнаружения наиболее

информативных горизонтов для дальнейшего отбора проб воды и последующего проведения лабораторных гидрохимических анализов. Всего за время исследований было выполнено порядка 152 измерения показателя ослабления направленного света.

Таблица 2.4 – Экспедиции НИС «Бирюза», в которых проводились измерения ПОС

Год	Дата	Количество станций					
2015	28-30.07	38					
2015	31.07	14					
2015	09.09	14					
2015	10.09	17					
2016	20-21.05	24					
2016	12-13.09	45					
Общее количество станций, на которых выполнялись							
измерения ПОС	152						

Для интерпретации результатов контактных гидрооптических исследований дополнительно использовались гидрологические данные и массивы данных космических оптических многоспектральных изображений. Космические снимки получены сотрудниками НИИ «Аэрокосмос». Метод получения и обработки космических данных подробно описаны в работе [119], а гидрологических – в работе [120].

В результате проведенных экспериментов и спутникового мониторинга получен набор данных, уникальный по мультидисциплинарному охвату характеристик явления.

**2.2.4 Залив Сиваш.** Сиваш – полузамкнутый мелководный залив Азовского моря. Сиваш является самым большим в мире гиперсоленым заливом и самым большим заливом в Европе. Он отделен от Азовского моря узкой песчаной Арабатской косой длиной 112–116 км. Его площадь составляет

2560 км<sup>2</sup>, а узкий пролив Тонкий соединяет его с морем на севере [48, 121]. До Северо-Крымского Сиваш полузакрытым строительства канала был неглубоким высокопродуктивным гиперсоленым заливом с множеством кос, островов, баров и впадин с солончаками и небольшими соляными бассейнами в районе залива и прилегающей территории. Средняя соленость составляла 140 ЕПС, в южной части – выше 200 ЕПС [121]. Строительство Северо-Крымского канала (1963–1975 гг.) все изменило. С 1963 года вода из Днепра стала поступать в канал, который использовался для орошения, а дренажные воды с орошаемых полей стали сбрасываться в залив. В результате в 1989средняя соленость в заливе снизилась до 17,0-22,6 ЕПС, и 1997 гг. сформировалась новая экосистема солоноватоводных вод [48]. Наиболее сильно пострадал от сбросов пресной воды Восточный Сиваш. Под действием днепровских сбросных и дренажных вод на некоторых участках Восточного Сиваша вода распреснилась до 35 ЕПС, в них создались благоприятные условия для воспроизводства и нагула глоссы и бычков [122]. В апреле 2014 года была перекрыта подача днепровской воды в Северо-Крымский канал. Сброс пресной воды в залив с сельскохозяйственных угодий практически прекратился. В роста солености в заливе началась трансформация результате новая экосистемы, произошли изменения во всех компонентах экосистемы, включая мейобентос [123-126].

В работе приводятся результаты регулярных комплексных гидрофизических, гидробиологических и биооптических исследований залива Сиваш, которые проводятся с 2013 г. по настоящее время [48, 52, 53, 124, 125, 127–130, 131]. В 2013 г. район работ занимал большую часть акватории Сиваша, примыкающей к Арабатской стрелке (рисунок 2.17). В 2014 году Крым вошел в правовое поле Российской Федерации, после чего часть станций Арабатской стрелки севернее Шакалинского сужения стали недоступны. Для работ в 2014–2015 гг. были выбраны точки со стороны Крымского берега Восточного Сиваша, а именно: на полуостровах Тюп-Тархан и Кут, а также в районе севернее Шакалинского сужения, неподалеку от устья реки Салгир

(рисунок 2.17). С 2018 года наблюдениями была охвачена еще и акватория Южного Сиваша, примыкающая к Арабатской стрелке, а также сама Арабатская стрелка до погранзаставы. На рисунке 2.17 представлены станции, которые выполнялись в различные годы.

За период с 2013 по 2020 гг. в заливе Сиваш было выполнено восемь полевых экспедиций. В 2013 г. было проведена одна экспедиция (14–18.06.2013), включающая 12 станций; в 2014 г. – две экспедиции (30.06-01.07.2014 и 16–18.10.2014), включающие по 4 станции; в 2015 г. – одна экспедиция (16–18.10.2015), включающая 4 станции; в 2018 г. – две экспедиции (14–15.05.2018 и 07–09.11.2018), включающие 14 станций каждая; в 2019 и 2020 гг. – по одной экспедиции (04–05.06.2019 и 15–20.06.2020), включающей 14 станций каждая (Таблица 2.5).

Год	Дата	Количество станций				
2013	14-18.06	12				
2014	30.06-1.07	4				
2014	16–18.10	4				
2015	16–18.10	4				
2018	14–15.05	14				
2018	07–09.11	14				
2019	04–05.06	14				
2020	15-20.06	14				
Общее количество станций, на которых выполнялись						
гидрооптические измерен	80					

Таблина	a 2	5 -	Экспел	инии	в	запив	Сиваш
таолиц	ч <b>2</b> .	9	Эконод	ET LLET ET ET	υ	Juind	Chibum

Во время полевых экспедиций в заливе Сиваш на каждой из запланированных станций выполнялся отбор проб воды для последующих лабораторных измерений солености, спектрального показателя ослабления направленного света, определения содержания взвешенных и растворенных

веществ. Отбирались также пробы воды и грунта для дальнейшего исследования мейобентоса [131].



Рисунок 2.17 – Схема расположения станций в заливе Сиваш

Определение солености в пробе проводилось с помощью рефрактометра REF 203/213. Для его калибровки использовалась бидистиллированная вода, отвечающая качеству воды ДСТУ ISO 3696 (класс 2, электропроводность 0,1 мСм). Использовалась также вода стандартная нормальная (IAPSO standart sea water, batch P152), практическая соленость 34,993 ЕПС. Пробы рассолов, измерение солености которых выполнено пикнометрическим методом, могут быть использованы как субстандарты (при калибрации прибора ДЛЯ рефрактометрии метода). Bce полученные полевого данные как контролировались на берегу с использованием пикнометрического метода. Подробно методика описана в работе [131, 132].

Измерения температуры воды выполнялись на месте, ртутным термометром. Для определения показателя ослабления направленного света применялись измерители СИПО9. В случаях, когда значения измеряемых параметров уходили за диапазон чувствительности прибора, пробы воды разбавлялись в свежеприготовленной бидистиллированной воде в необходимых пропорциях [131]. Для определения содержания растворенного органического вещества использовался гидрофизический комплекс Кондор.

Исследования бентоса проводились сотрудниками ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ, методы взятия и обработки проб даны в опубликованных работах [52].

#### Выводы к разделу 2

Опыт предшествующих лет по созданию измерителей показателя ослабления направленного света позволил соискателю, совместно С сотрудниками отдела оптики и биофизики моря ФГБУН ФИЦ МГИ, разработать компактные автономные прозрачномеры, отвечающие современному уровню оптического приборостроения [47, 96].

Созданная новая аппаратура была использована соискателем при выполнении серии гидрооптических съемок на акваториях с различными физико-географическими условиями и разной степенью антропогенной нагрузки: вся северная часть Черного моря в пределах экономической зоны России [49, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117], в районе Гераклейского

полуострова [51, 118, 119] и в заливе Сиваш [48, 52, 53, 124, 125, 127–131]. В результате была создана новая база гидрооптических данных, содержащая более 1100 станций.

Для всех исследуемых акватории были определены регрессионные соотношения, связывающие показатель ослабления направленного света с концентрацией общего взвешенного вещества [100, 101].

# РАЗДЕЛ 3 ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЩЕГО ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В РОССИЙСКОМ СЕКТОРЕ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ И ЕЕ СВЯЗЬ С ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

## 3.1 Результаты отдельных съемок

**3.1.1 Объем работ.** В настоящем разделе рассматриваются результаты исследований пространственно-временной изменчивости гидрооптической структуры вод по данным, полученным в следующих рейсах НИС «Профессор Водяницкий»: 87-й рейс – 30.06–20.07.2016; 89-й рейс – 16.11–05.12.2016; 94-й рейс – 22.04–06.05.2017; 95-й рейс – 14.06–04.07.2017; 98-й рейс – 15.11–27.11.2017; 102-й рейс – 09.06–01.07.2018; 103-й рейс – 28.08–18.09.2018; 106-й рейс – 18.04–13.05.2019; 115-й рейс – 27.11–16.12.2020. Все экспедиции условно разделены на четыре сезона, хотя некоторые из них по срокам охватывают соседние сезоны.

## 3.1.2 Весенние съемки.

**3.1.2.1 Количество съемок.** В весенний сезон были выполнены две съемки, проведенные в период с 22.04 по 6.05 2017 г. и с 18.04 по 13.05 2019 г.

**3.1.2.2 Весенняя съемка 2017 года (22.04–6.05.2017).** Весной 2017 года (22.04 – 6.05.2017) [111, 113] на большей части исследованной акватории диапазон пространственной изменчивости концентрации общего взвешенного пределах 0,4–0,6 мг/л вещества в поверхностном слое варьировал в (рисунок 3.1, а). Сравнение контактных фактических измерений co спутниковыми данными показало, что невысоким концентрациям общего взвешенного вещества соответствовали и пониженные значения восходящей яркости моря (рисунок 3.1, б). Исключение составляла северо-восточная часть съемки, где отмечалось повышение содержания взвешенного вещества, которое, согласно спутниковым данным (рисунок 3.1, б), связано с выносом более мутных азовских вод через Керченский пролив в исследованную акваторию. Распределения солености (рисунок 3.1, в) и векторов инструментально измеренных течений на поверхности (рисунок 3.1, г) показывают, что в этой части съемки преобладали течения на запад, способствующие поступлению распресненных и мутных вод на акваторию к югу от Керченского полуострова [113].





Рисунок 3.1 – Распределение: а – концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л), осредненной по слою 1–5 м; б – коэффициента яркости моря на 555 нм ( $R_{rs}$  ср<sup>-1</sup>) (спутниковые данные); в – солености (S, ЕПС), осредненной по слою 1–5 м; г – векторы инструментально измеренных течений (см/с) на горизонте 30 м

Анализ вертикальной структуры гидрооптических и термохалинных полей в пределах фотического слоя (0–50 м) выявил следующие особенности. Весной 2017 г. выраженный максимум скопления взвешенных частиц в вертикальном распределении отсутствовал (рисунок 3.2). Толщина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) не превышала нескольких метров, а средняя глубина залегания максимальных градиентов температуры и плотности составляла 3–5 м. В целом вертикальные градиенты термохалинных параметров в весенний период были невелики [113].



Рисунок 3.2 – Средние по полигону вертикальные распределения: а – температуры (T, °C) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); б – солености (S, ЕПС) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); условной плотности (P, кг/м<sup>3</sup>) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л). Серые области – распределения коэффициентов линейной корреляции R между пространственными распределениями соответствующих параметров по глубине. Штриховые линии – доверительные интервалы 95%ной значимости

Для оценки связи  $C_{obb}$  и термохалинных параметров на различных глубинах на каждом горизонте с дискретностью 1 м по совокупности всех станций были рассчитаны коэффициенты линейной корреляции между значениями  $C_{obb}$  на каждой станции и значениями температуры, солености и плотности [11]. В период исследований в верхнем слое отмечались низкие связи между  $C_{obb}$  и термохалинными параметрами (R < 0,4) (рисунок 3.2). Вероятной причиной этому является различное время приспосабливания гидрологических и гидрооптических полей в условиях интенсивного весеннего прогрева.

**3.1.2.3** Весенняя съемка 2019 года (18.04–13.05.2019). Весной 2019 года (18.04–13.05.2019) величины концентрации общего взвешенного вещества на полигоне в верхнем 5-ти метровом слое в период проведения съемки изменялись в диапазоне 0,35–1,2 мг/л (рисунок 3.3, а). В западной части полигона (западнее 36° в.д.) в основном наблюдались низкие значения С<sub>овв</sub> (не выше 0,45 мг/л). Повышение значений С<sub>овв</sub> отмечалось на прибрежном шельфе у южных берегов Крыма, между м. Аю-Даг и м. Меганом значения С<sub>овв</sub> достигали 0,8–1 мг/л. Минимумы С<sub>овв</sub> (ниже 0,37 мг/л) прослеживались у южной границы полигона и совпадали с областями максимальных значений солености.

В восточной части съемки в целом отмечались более высокие значения Совв (выше 0,5 мг/л). У берегов Кавказского побережья между м. Константиновский и м. Кодош было выявлено мутная (Совв ~ 0,8-0,9 мг/л) и распресненная (17,3–17,4 ЕПС) область, обусловленная вдольбереговым переносом вод, которые образуются в результате стока Риони, Ингури и др. более мелких рек (рисунок 3.3, а, в). Эти мутные и низкосоленые воды переносились вдольбереговым потоком ОЧТ на север почти до м. Идокопас. Самые высокие значения Совв (выше 1,1 мг/л) были обнаружены у берегов Керченского полуострова и в Феодосийском заливе. Согласно распределениям солености (рисунок 3.3, в) и векторов геострофических и инструментально измеренных течений (рисунок 3.3, б, г) сюда, так же как и в период предыдущей весенней съемки, поступали низкосоленые и мутные азовоморские воды из Керченского пролива. Следы этих вод по пониженным значениям солености (ниже 18,1 ЕПС) и повышенным значениям С<sub>овв</sub> (выше 0,7 мг/л) прослеживались вплоть до Ялты (рисунок 3.3, а, в).



Рисунок 3.3 – Распределение: а – концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л), осредненной по слою 1–5 м; б – динамической топографии 0/300 и векторов геострофических течений (см/с); в – солености (S, ЕПС), осредненной по слою 1–5 м; г – векторов инструментально измеренных течений (см/с) на

#### горизонте 30 м

В отличие от 2017 г., когда вертикальная стратификация гидрологических параметров была слабо выражена, что в свою очередь обусловило низкие коэффициенты линейной корреляции гидрологических параметров с  $C_{\text{овв}}$  (R < 0.4), весной 2019 г., между значениями  $C_{\text{овв}}$  и значениями температуры,





Рисунок 3.4 – Средние по полигону вертикальные распределения: а – температуры (T, °C) и концентрации ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л); б – солености (S, ЕПС) и концентрации ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л); условной плотности (P, кг/м<sup>3</sup>) и концентрации

ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л). Серые области – распределения коэффициентов линейной корреляции R между пространственными распределениями соответствующих параметров по глубине. Штриховые линии – доверительные интервалы 95%-ной значимости

Между С<sub>овв</sub> и температурой до глубин ~ 65 м наблюдалась положительная корреляция. Положительную корреляцию в слое глубин ~ 40-60 м между можно объяснить тем, температурой и Совв ЧТО на горизонтальных областям повышенными значениями распределениях с температуры соответствуют области с повышенными значениями Совв. Учитывая, что в среднем наблюдается понижение Совв и температуры с глубиной, то заглубление более теплых вод сопровождается заглублением вод с повышенными Совв. Глубже корреляция была отрицательной. Между Совв и соленостью и плотностью линейная корреляция во всей исследованной толще вод была отрицательной (рисунок 3.4, в).

Отметим, что в период весенней съемки 2019 г. гидрооптические измерения были проведены до глубины 200 м. Это позволило проанализировать не только горизонтальные линейные связи между термохалинной и оптической структурами вод с дискретностью 1 м. по вертикали в верхних слоях, но и рассмотреть связь отдельных экстремумов С<sub>овв</sub> с изопикническими поверхностями вплоть до сероводородной зоны, положение верхней границы которой определяется по плотности 16,2 кг/м<sup>3</sup> [133].

В вертикальной структуре С<sub>овв</sub> прослеживались несколько экстремумов, глубину залегания которых можно связать с особенностями термохалинной структуры вод. На рисунок 3.5 приведены примеры типичных вертикальных распределений С<sub>овв</sub> и вертикальных градиентов температуры (ВГТ), солености (ВГС) и плотности (ВГП) в различных районах полигона.

В западной части полигона (как пример, станция № 25 на рисунке 3.5) в вертикальных распределениях  $C_{obb}$  и термохалинных характеристик наблюдался выраженный верхний квазиоднородный слой, толщина которого изменялась в пределах от 7 до 45 м. Под ВКС прослеживался сезонный термоклин, при этом пикноклин и галоклин здесь были выражены менее четко. В слое сезонного термоклина отмечалось понижение значений  $C_{obb}$  (рисунок 3.5, ст. № 25).

В восточной части полигона (рисунок 3.5 станция № 137) толщина ВКС заметно уменьшалась и не превышала 5–25 м. Под ВКС наблюдались хорошо

выраженные сезонные термоклин и пикноклин. В отличие от западной части полигона (станция № 25), в восточной части (станция № 137) в слое термоклина и пикноклина на глубинах 6–35 м наблюдался максимум значений  $C_{obb}$  (как пример, станция № 137 на рисунке 3.5). Значения  $C_{obb}$  в этом максимуме варьировали от 0,35 мг/л в глубоководной части полигона до 0,9 мг/л над свалом глубин и прибрежным шельфом. Между глубинами залегания этого максимума  $C_{obb}$  и максимумов ВГТ и ВГП выявлен высокий уровень линейной корреляции с величиной R ~ 0,94–0,95 (рисунок 3.6, а, б) [11].



Рисунок 3.5 – Вертикальные профили концентрации ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л) и вертикальных градиентов температуры (ВГТ, °С /м), солености (ВГС, ЕПС/м) и плотности (ВГП, (кг/м<sup>3</sup>)/м) на разных станциях. Номера станций указаны на графиках

В центральной части полигона, на станциях, расположенных на перифериях циклонического круговорота (станции № 82, 97 на рисунке 3.5), на глубинах от 30 м до 65 м наблюдался, помимо термоклинного максимума, еще один максимум С<sub>овв</sub>, значения в котором составляли 0,3–0,5 мг/л. Этот

максимум располагался несколько глубже ядра холодного промежуточного слоя (ХПС) в слое основного пикноклина и галоклина (как пример, станции  $N_{2}$  82, 97 на рисунке 3.5). Между глубиной залегания этого максимума С<sub>овв</sub> и глубинами залегания ядра ХПС и максимумов ВГП и ВГС, соответствующих основным пикноклину и галоклину, также выявлен высокий уровень линейной связи с величинами R ~ 0,81–0,86 (Рисунок 3.6, в – д).





Рисунок 3.6 – Графики линейной связи между глубинами залегания максимумов концентрации ОВВ (HC<sub>овв</sub> макс, м) и: а – максимальных вертикальных градиентов температуры (H ВГТмакс, м) в слое 5–35 м; б – максимальных вертикальных градиентов плотности (H ВГП макс, м) в слое 5–35 м; в–ядра ХПС (H ядра ХПС, м); г – максимальных вертикальных градиентов плотности (H ВГПмакс, м) в слое 30–65 м; д – максимальных вертикальных градиентов солености (H ВГСмакс, м) в слое 30–65 м; е –

глубины изопикны 16,1 кг/м<sup>3</sup> (НР, м). Штриховые линии – границы 95%-го доверительного интервала

Под основными пикноклином и галоклином в слое 80–170 м практически на всех станциях хорошо прослеживался еще один максимум  $C_{obb}$ . На осредненном профиле  $C_{obb}$  максимум в этом слое располагался примерно на глубине 120 м (рисунок 3.7, а), которая соответствовала изопикнической поверхности 16,1 кг/м<sup>3</sup> (рисунок 3.7, б) [11]. Между глубинами залегания этого максимума  $C_{obb}$  и изопикны 16,3 кг/м<sup>3</sup> выявлен высокий уровень линейной корреляции с величиной R ~ 0,94 (рисунок 3.6, е).

Анализируя пространственные характеристики глубинного максимума  $C_{obb}$  отметим, что минимальные глубины (85–100 м) и значения (0,28–0,3 мг/л) максимума  $C_{obb}$  наблюдались у южной границы полигона. В направлении свала глубин глубина залегания максимума  $C_{obb}$  увеличивалась до 150–170 м, при этом значения максимума возрастали до 0,45–0,5 мг/л. Повышенные значения максимума  $C_{obb}$  (0,34–0,4 мг/л) отмечались также на перифериях циклонического круговорота (рисунок 3.8).



Рисунок 3.7 – а – осредненный по всем станциям вертикальный профиль С<sub>овв</sub> (мг/л) в слое 100–180 м; б – зависимость величин С<sub>овв</sub> (мг/л) от плотности (кг/м<sup>3</sup>)



Рисунок 3.8 – Зависимость концентрации ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л) от глубины сероводородного слоя максимальных значений ОВВ

# 3.1.3 Летние съемки.

**3.1.3.1 Количество съемок.** Гидрооптические исследования в летний период регулярно выполнялись с 2016 по 2018 гг. и охватывали июнь – июль.

**3.1.3.2** Летняя съемка 2016 года (30.06–20.07.2016). Летняя съемка 2016 года (30.06–20.07.2016) [110, 114, 115] показала, что в поверхностном слое диапазон изменчивости концентрации общего взвешенного вещества колебался в пределах 0,3–0,9 мг/л (рисунок 3.9, а). Наиболее высокие значения наблюдались в северо-западной части исследуемого района. Здесь область более мутных вод совпала с областью распресненных вод (ограниченной изохалиной 17 ЕПС), которые поступают из прибрежных районов северо-западного шельфа [115].



Рисунок 3.9 – Распределение: а – концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л), осредненной по слою 1–5 м; б – векторов инструментально измеренных течений (см/с) на горизонте 30 м (А –антициклонические вихри, Ц – циклонический); в – температуры (Т, °С), осредненной по слою 1–5 м; г – солености (S, ЕПС), осредненной по слою 1–5 м; д – глубины залегания максимального вертикального градиента температуры (Н ВГТмакс, м); е – глубина залегания максимума концентрации ОВВ (НС<sub>овв</sub>макс, м)

Распределение взвешенного вещества на большей части исследованной акватории имело пятнистую структуру, характеризующуюся чередованием областей с повышенными и пониженными значениями его концентраций. Масштабы пятен варьировали от нескольких десятков до ста километров. Такое неоднородное распределение взвешенного вещества, в основном, связано с особенностями развития фитопланктона, обусловленными динамикой вод и распределением гидрологических параметров. По данным этой съемки хорошо проявляется влияние синоптической структуры гидрологических полей на распределение Совв. В областях антициклонических вихрей (зоны конвергенций) общего взвешенного вещества было меньше, что обусловливается уменьшением концентраций биогенных в антициклонах веществ, необходимых ДЛЯ жизнедеятельности фитопланктона. Более благоприятные условия для развития фитопланктона наблюдались в юго-восточной части съемки в окрестностях циклонического вихря в связи с поступлением глубинных вод, обогащенных биогенными элементами, в эвфотическую зону [36, 134].

В поверхностном слое отмечалась тенденция к совпадению положения областей пониженной температуры и повышенных значений взвешенного вещества (рисунок 3.9, в), тогда как связь между соленостью и взвешенным веществом явно не прослеживалась (рисунок 3.9, г).

В горизонтальном распределении взвешенного вещества обнаружена её качественная связь с динамикой вод. Так в прибрежной зоне Крыма, на наблюдалась северной периферии Основного черноморского течения, тенденция к заглублению слоя максимального вертикального градиента температуры (рисунок 3.9, д). Здесь же отмечалось заглубление слоя максимальных значений взвешенного вещества (рисунок 3.9, е). В тоже время, в южной части полигона, ближе к центру основного циклонического круговорота Черного моря, где глубина залегания максимального вертикального градиента (рисунок 3.9, д), температуры минимальна отмечался подъем слоя максимальных значений концентраций взвешенного вещества (рисунок 3.9, е) [115].

В вертикальном распределении взвешенного вещества прослеживалась типичная для летнего сезона [36] стратификация, характеризующаяся наличием в море верхнего оптически однородного слоя, совпадающего с верхним квазиоднородным слоем И резким увеличением содержания обшего В термоклине. Глубина положения взвешенного вещества максимума концентрации взвешенного вещества, который располагался в термоклине, варьировала в пределах 13-28 м, а сами величины концентраций в максимуме претерпевали большие изменения ~ 1–4 мг/л. На станциях, где наблюдался максимальный градиент температуры, слой с максимальным скоплением взвеси был относительно тонким (~ 1–3 м), при этом значения концентрации взвеси были максимальные. На станциях, где градиент температуры был слабо выражен и растянут по вертикали, слой максимального скопления взвеси тоже растягивался по вертикали, при этом ее концентрация была ниже, чем в случае термоклина. Пространственное распределение резкого величины максимального градиента температуры и толщины слоя с максимальными значениями концентраций взвешенного вещества представлены на рисунке 3.10, а и 3.10, б соответственно.



Рисунок 3.10 – Распределение: а – величины максимального градиента температуры (ВГТмакс, °С); б – толщины слоя с максимальными значениями концентрации ОВВ (НС<sub>овв</sub>макс, м)

Оценка линейной связи между  $C_{obb}$  и термохалинными параметрами с дискретностью по вертикали 1 м по совокупности всех станций выявила следующие закономерности. Между  $C_{obb}$  и температурой выявлена достаточно высокая отрицательная корреляция (R ~ 0,75) на нижней границе ВКС и высокая положительная корреляция под термоклином (R ~ 0,85) (рисунок 3.11, а). Аналогичная связь, но с противоположными знаками, наблюдалась между  $C_{obb}$  и соленостью и плотностью, коэффициенты корреляции достигали 0,85 (рисунок 3.11, б, в).

Наиболее слабая связь была выявлена между вертикальными распределениями С<sub>овв</sub> и соленостью, при этом положительная корреляция (R ~ 0,45–0,55) между С<sub>овв</sub> и соленостью наблюдалась в слое, близком к максимальному скоплению общего взвешенного вещества (рисунок 3.11, б). Характерно, что в верхнем 5-метровом слое наблюдались невысокие отрицательные значения коэффициентов линейной связи между С<sub>овв</sub> и соленостью.

В общем случае в верхнем слое отрицательные связи между С<sub>овв</sub>, температурой и плотностью, вероятно, связаны с тем, что в более холодных и плотных водах более активно развиваются биологические объекты, которые увеличивают концентрации С<sub>овв</sub>. В то время как отрицательные значения коэффициентов линейной связи между С<sub>овв</sub> и соленостью обусловлены увеличением количества взвеси в низкосоленых водах речного стока и азовоморского происхождения.

В сезонном термоклине положительные корреляции между  $C_{obb}$  и температурой и отрицательные – между  $C_{obb}$  и соленостью и плотностью можно объяснить следующим эффектом. При генеральном уменьшении значений  $C_{obb}$  и температуры и увеличении солености и плотности с глубиной появление на данном горизонте более теплых вод (т.е. их опускание) или более холодных вод (т.е. их подъем) будет сопровождаться увеличением (уменьшением) значений  $C_{obb}$  и уменьшением (увеличением) значений солености и плотности и плотности, что определяет соответствующий знак корреляции между этими параметрами.



Рисунок 3.11 – Средние по полигону вертикальные распределения: а – температуры (T, °C) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); б – солености (S, ЕПС) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); условной плотности (P, кг/м<sup>3</sup>) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л). Серые области – распределения коэффициентов линейной корреляции R между пространственными распределениями соответствующих параметров по глубине. Штриховые линии – доверительные интервалы 95%-

## ной значимости

**3.1.3.3** Летняя съемка 2017 года (14.06.17–4.07.17). Летняя съемка 2017 года (14.06.17–4.07.17) показала, что, по сравнению с предшествующим и последующим годами, наблюдались низкая прозрачность поверхностных вод и высокое содержанием взвешенных частиц, что было связано с интенсивным цветением кокколитофорид [135–137]. Диапазон изменчивости концентрации общего взвешенного вещества в поверхностном слое колебался в пределах 0,4–1,5 мг/л (рисунок 3.12, а). Соответствующие коэффициенты яркости моря составляли 4–6% при обычных 1–1,5%. Минимальная прозрачность вод была отмечена также, как и весной этого же года к югу от Керченского полуострова,

где наблюдались воды пониженной солёности. Отметим, что принципиальным отличием летней съемки от весенней являлось то, что эти мутные воды, согласно спутниковым данным (рисунок 3.12, б), имели не азовское происхождение, а поступали на акваторию съемки от берегов Кавказа. Эти воды, подхваченные струей Основного черноморского течения, следовали вдоль материкового склона на запад и достигали долготы Гераклейского полуострова (рисунок 3.12, а – г) [113].





43.5°

33°

34

Г

36° F

18.5

36° E

43,5°

43

320

33°

34

В

Отметим также, что по спутниковым данным (рисунок 3.12, б) в июне 2017 г. значительная северо-западного шельфа, Каркинитский часть И Каламитский заливы были заняты водами с относительно низким содержанием взвешенного вещества. Пятно с низким содержанием взвешенного вещества (0,4–0,5 мг/л) зафиксировано в Каламитском заливе также и по данным прямых контактных измерений (рисунок 3.12, а) [113]. В более глубоководных и открытых районах Черного моря в июне 2017 г. наблюдались относительно высокие концентрации взвешенного вещества. Вероятной причиной таких контрастов между северо-западным шельфом и открытым морем является то, что в глубоководных районах происходило интенсивное развитие микроводорослей (кокколитофорид), что способствовало более высоким значением концентрации взвешенного вещества по сравнению с шельфом.

Анализ вертикальной структуры гидрооптических и термохалинных полей в пределах фотической зоны в летний период 2017 г. выявил следующие особенности. В поле Совв, так же, как и в 2016 г., наблюдался хорошо выраженный максимум в сезонном термоклине. Основным отличием от 2016 г. было высокое содержание взвешенных частиц как в максимуме, так и над ним (рисунок 3.13), причем разница концентрации между максимумом И вышележащими слоями была существенно меньше, чем в 2016 г. (разница между значениями концентраций общего взвешенного вещества для ВКС и термоклина, в среднем в июне 2016 г. составляла 1 мг/л, а в июне 2017 г. – 0,3 мг/л). Это обусловлено особенностями строения клеток микроводорослей кокколитофорид. Кокколитофориды имеют плотную известковую внешнюю оболочку, благодаря которой, процент проникновения света внутрь клетки существенно ниже, чем у большинства других видов микроводорослей. Таким образом. кокколитофориды выдерживают условия высокой солнечной инсоляции, которая наблюдается в летний период в поверхностном слое, поэтому распределяются более равномерно по всему ВКС. Под термоклином наблюдалось уменьшение содержания взвешенных частиц.



Рисунок 3.13 – Средние по полигону вертикальные распределения: а – температуры (T, °C) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); б – солености (S, ЕПС) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); условной плотности (P, кг/м<sup>3</sup>) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л). Серые области – распределения коэффициентов линейной корреляции R между пространственными распределениями соответствующих параметров по глубине. Штриховые линии – доверительные интервалы 95%ной значимости

Оценки связи распределений  $C_{obb}$  и термохалинных параметров на отдельных горизонтах по совокупности всех станций и ее изменения с глубиной показали закономерности, которые наблюдались и в летний период 2016 г. Наиболее высокие коэффициенты линейной корреляции получены между  $C_{obb}$  и температурой ( $R \sim 0.7$ ), а также между  $C_{obb}$  и плотностью ( $R \sim 0.7$ ) (рисунок 3.13, а, в). Наиболее слабая связь, как и в 2016 г. была выявлена между вертикальными распределениями  $C_{obb}$  и соленостью (рисунок 3.13, б).

Распределения глубины залегания максимума С<sub>овв</sub> и максимума вертикального градиента температуры качественно показывают одинаковые пространственные особенности (рисунок 3.14). Увеличение глубины залегания максимумов обоих параметров (до 20–25 м) наблюдалось южнее Керченского полуострова, на северо-западе и в южной части съемки. Ее минимальные значения в обоих случаях отмечались ближе к побережью Крымского полуострова.

Показано, что в летний период 2017 г. между глубинами залегания максимума С<sub>овв</sub> и максимальных вертикальных градиентов температуры и плотности существует значимая линейная связь с величинами R порядка 0,65 (рисунок 3.15) [114].



Рисунок 3.14 – Распределение: а – глубины залегания максимальных значений концентрации ОВВ (HC<sub>овв</sub>макс, м); б – максимального вертикального градиента температуры (ВГТ макс, °С)



Рисунок 3.15 – Графики линейной связи между глубинами залегания максимумов С<sub>овв</sub> (НС<sub>овв</sub>макс, м) и: а – максимальных вертикальных градиентов температуры (Н ВГТмакс, м); б – максимальных вертикальных градиентов плотности (Н ВГПмакс, м). Штриховые линии – границы 95%-го доверительного интервала

**3.1.3.4 Летняя съемка 2018 года (09.06.18–1.07.18).** Летняя съемка 2018 года (09.06.18–1.07.18). К сожалению, из-за нехватки экспедиционного времени, гидрооптические измерения были выполнены только в восточной части запланированной съемки от м. Меганом до г. Сочи.

Диапазон пространственной изменчивости концентрации общего взвешенного вещества в поверхностном слое варьировал в пределах 0,4-0,9 мг/л (рисунок 3.16, а), что соответствует величинам, полученным летом 2016 г. В прибрежной акватории было выявлено два локальных максимума, где, наряду с минимальной соленостью (рисунок 3.16, б), наблюдались повышенные значения концентраций взвешенного вещества. Наиболее выраженный максимум был выявлен восточнее Феодосийского залива и связан с наличием в этом районе локального источника мутных вод. Второй максимум наблюдался в

районе Туапсе, и также был связан с наличием здесь локального источника распресненных и мутных вод [116].



Рисунок 3.16 – Распределение: а – концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л), осредненной по слою 1–5 м; б – солености (S, ЕПС), осредненной по слою 1–5 м; в – векторов инструментально измеренных течений (см/с) на горизонте 30 м; г – температуры (T, °C), осредненной по слою 1–5 м; д – глубины залегания максимума концентрации ОВВ (HC<sub>овв</sub>макс, м)

Следует отметить, что распространение более мутных вод от источника у Туапсе происходило, преимущественно, не вдоль Кавказского побережья, а от его берега в глубоководную часть. Такая структура распределения полей солености и общего взвешенного вещества объясняется особенностями гидродинамического проведения режима В момент исследований (рисунок 3.16, в). Так, в этот период, между Новороссийском и Туапсе наблюдался антициклонический вихрь, на восточной периферии которого наблюдался вынос распресненных и более мутных вод в открытую глубоководную часть полигона [116].

Помимо прибрежных максимумов, в глубоководной части, на траверзе Новороссийска, была обнаружена область с максимальными концентрациями общего взвешенного вещества. Пространственное распределение поля температуры показало, что в этой области наблюдался ее минимум, который косвенно свидетельствует о том, что термоклин здесь находился наиболее близко к поверхности, по сравнению с другими станциями (рисунок 3.16, г). Соответственно, более высокое скопление общего взвешенного вещества, располагающееся над слоем максимального температурного градиента, в данном случае, проявилось в поверхностном слое. Данный факт, также подтверждается глубиной залегания максимума концентрации взвеси. Как показано на рисунке 3.16, д, в этой области он располагается на глубине ~ 3-5 м [116].

В вертикальном распределении взвешенного вещества в пределах фотической ЗОНЫ прослеживалась подобная летнему периоду 2016 г. стратифицированная структура, характеризующаяся наличием одного или нескольких максимумов на плотностных градиентах. Глубина залегания значений COBB располагалась максимальных также под верхним квазиоднородным слоем и варьировала в пределах от 2 до 23 м, с тенденцией заглубления преимущественно у берегов в северной части полигона.



a

б

В

Рисунок 3.17 – Средние по полигону вертикальные распределения: а – температуры (T, °C) и концентрации ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л); б – солености (S, ЕПС) и концентрации ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л); условной плотности (P, кг/м<sup>3</sup>) и концентрации

ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л). Серые области – распределения коэффициентов линейной корреляции R между пространственными распределениями соответствующих параметров по глубине. Штриховые линии – доверительные интервалы 95%-

В фотической зоне при сопоставлении вертикальных профилей Совв и гидрологических параметров (рисунок 3.17) выявленные особенности линейной параметрами были корреляции между ЭТИМИ качественно подобны 2016 2017 гг. особенностям, В И Отмечалось выявленным наличие отрицательной линейной связи между Совв и температурой и между Совв и соленостью, а также положительной линейной связи между Совв и плотность в ВКС. В термоклине между Совв и температурой и между Совв и плотностью знак корреляции менялся на противоположный.

## 3.1.4 Осенние съемки.

**3.1.4.1 Количество съемок.** В осенний период было выполнено три съемки, которые проводились во второй половине сентября в 2016 г. (30.09–20.10.2016), в ноябре 2017 г. (14.11–28.11.2017) и в начале осени 2018 г. (28.08–18.09.2018). Осенью 2016 г. дополнительно проводились гидробиологические исследования микропланктона (определялись концентрация хлорофилла-а (С<sub>хл</sub>), видовой состав и численность видов микропланктона).

**3.1.4.2 Осенняя съемка 2016 года (30.09–20.10.2016).** В первой половине осени 2016 г. [49, 115] отмечалась высокая прозрачность вод с низким содержанием взвешенных частиц. Диапазон изменчивости концентрации общего взвешенного вещества в поверхностном слое колебался в пределах 0,15-0,4 мг/л (рисунок 3.18, а), а изменчивость его органической живой фракции (концентрации хлорофилла-а) варьировала, в основном, в пределах 0,1-0,5 мкг/л (рисунок 3.18, б). Исключение составил район Феодосийского залива. где наблюдалось присутствие вод с высоким содержанием концентраций С<sub>овв</sub> (до 2,2 мг/л) и С<sub>хл</sub> (до 1,1 мкг/л). Здесь область более мутных вод совпадала с областью распресненных керченско-феодосийских вод (рисунок 3.18, в), которые формируются как в самом Феодосийском заливе, так и поступают в верхнем слое с ОЧТ из района Керченского пролива (рисунок 3.18, а).



Рисунок 3.18 – Распределение: а – концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) на горизонте 3 м; б – концентрации хлорофилла-а (С<sub>хл</sub>, мкг/л) на поверхности; в – солености (S, ЕПС) на горизонте 1 м

Несмотря на малые значения концентрации взвешенных частиц и ее слабой пространственной изменчивости, обнаруживается косвенная связь между динамикой вод и распределением  $C_{obb}$ . Так, в зонах Севастопольского и Феодосийского антициклонов отмечается заглубление слоя максимальных значений  $C_{obb}$  (рисунок 3.19, е). Эти антициклоны хорошо проявляются на карте инструментальных измерений течений на горизонте 25 м (рисунок 3.19, б) и идентифицируются по областям максимальной температуры и минимальной солености (рисунок 3.19, в, г) на глубинах 20–30 м, а также заглублением ВКС (рисунок 3.19, д). В тоже время, в южной части съемки, ближе к центру основного циклонического круговорота Черного моря, где глубина нижней границе ВКС минимальна, отмечается подъем слоя максимальных величин  $C_{obb}$ .



Рисунок 3.19 – Распределение: а – векторов инструментально измеренных течений (см/с) на горизонте 10 м; б – векторов инструментально измеренных течений (см/с) на горизонте 30 м; в – солености (S, ЕПС); г – температуры (T, °C) на горизонте 25 м; д – глубины нижней границе ВКС (H ВКС, м); е – глубины залегания максимума концентрации ОВВ (HC<sub>овв</sub>макс, м)

В вертикальном распределении общего взвешенного вещества, как и летом, наблюдалась стратифицированная структура с наличием верхнего оптически однородного слоя, нижняя граница которого качественно совпадала с глубиной ВКС и максимума содержания общего взвешенного вещества в термоклине. В октябре 2016 г. глубина положения максимума  $C_{oBB}$  варьировала в широких пределах 12–40 м, однако сами значения  $C_{oBB}$  в максимуме были существенно ниже, чем в летний сезон и претерпевали слабые изменения (от 0,2 до 0,4 мг/л), за исключением района Феодосийского залива, где значения  $C_{oBB}$  достигали 3 мг/л.

Осенью 2016 г. по сравнению с летним периодом наблюдались более низкие коэффициенты линейной корреляции между значениями С<sub>овв</sub> и температуры, солености и плотности по совокупности всех станций, величины которых не превышали 0,5 (рисунок 3.20) [115].

**3.1.4.3 Осенняя съемка 2017 года (14.11–28.11.2017).** В ноябре 2017 г. концентрация общего взвешенного вещества в поверхностном слое изменялась пределах 0,12–0,8 мг/л. В западной части съемки пространственное В распределение концентрации взвеси в поверхностном слое имело достаточно однородную структуру. Здесь Совв изменялась в диапазоне 0,2-0,3 мг/л (рисунок 3.21, а). В этой же области и отмечено относительно однородное распределение по солености (рисунок 3.21, б). Более высокие значения концентраций взвеси (до 0,55 мг/л) были отмечены в центральной части полигона вдоль Южного берега Крыма. Данная область характеризуется понижением солености и увеличением температуры (рисунок 3.21, в). Как и в предыдущих съемках, максимальные значения концентраций взвеси в пространственном поверхностном распределении выявлены в восточной части полигона, где они достигали величин 0,8 мг/л. Как и по результатам предыдущих съемок, в этой области наблюдается вынос более пресных Азовских вод через Керченский пролив и увлечением их Основным черноморским течением.



Рисунок 3.20 – Средние по полигону вертикальные распределения: а – температуры (T, °C) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); б – солености (S, EПC) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); условной плотности (P, кг/м<sup>3</sup>) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л). Серые области – распределения коэффициентов линейной корреляции R между пространственными распределениями соответствующих параметров по глубине. Штриховые линии – доверительные интервалы 95%ной значимости

В ноябре 2017 г. вертикальная стратификация общего взвешенного вещества существенно отличалась от его стратификации в октябре 2017 г. В ноябре в вертикальном распределении в пределах верхнего 50-ти метрового слоя наблюдалась слабо выраженная стратификация, изменчивость концентрации ОВВ по вертикали не превышала 0,1 мг/л. Толщина ВКС достигала глубин 35–45 м, распределение ОВВ в нем было однородным. Существование в период проведения исследования термоклина, хотя и слабо выраженного (вертикальные градиенты T не превышали 0,3°C м<sup>-1</sup>), в некоторой степени повлияло на вертикальную стратификацию взвеси. В пределах ВКС
наблюдалось практически однородное распределение OBB. В термоклине отсутствовал максимум С<sub>овв</sub>, характерный для периодов с ярко выраженной стратификацией гидрологических параметров.



Рисунок 3.21 – Распределение: а – концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) в слое 4–5 м; б – солености (S, ЕПС) на горизонте 1 м; в – температуры (T, °С) на горизонте 1 м

Под термоклином наблюдались наиболее прозрачные воды С минимальным содержанием взвешенных частиц, концентрация ИХ здесь варьировала в пределах 0,1-0,13 мг/л, с минимумом под ядром холодного промежуточного слоя (ХПС), глубина залегания которого изменялась в широком диапазоне, с тенденцией наибольшего заглубления В районе материкового склона. Толщина слоя с минимальными значениями Совв достигала по вертикали 50 м и располагалась на глубинах 50-100 м. Ниже этого слоя отмечено увеличение концентрации взвешенных частиц. Вертикальное

распределение взвешенного вещества здесь характеризовалось наличием, в основном, нескольких максимумов, толщина которых достигала 10–15 м. Величины концентрации взвеси в этом слое не превышали 0,4 мг/л и, в целом, были сопоставимы с величинами в фотическом слое. На осредненном профиле С<sub>овв</sub> основной максимум в этом слое располагался примерно на глубине 170 м (рисунок 3.22, а), которая соответствовала изопикнической поверхности 16,3 кг/м<sup>3</sup> (рисунок 3.22, б). Анализ глубины залегания этого максимума С<sub>овв</sub> на каждой отдельной станции показал, что на акватории съемки она изменялась в широком диапазоне 100 170 м. Оценки ОТ ЛО согласованности пространственных распределений глубин залегания этого максимума Совв и изопикнических поверхностей 0.1 кг/м<sup>3</sup>. с дискретностью различных соответствующих субкислородной редокс-зоне (15.5)16,15 кг/м<sup>3</sup>) \_ (рисунок 3.22, в) и сероводородной зоне  $(16,2-16,6 \text{ кг/м}^3)$  (рисунок 3.22, г – е) показали, что максимальный уровень линейной корреляции с величиной R ~ 0,936 наблюдается для глубины залегания изопикны 16,3 кг/м<sup>3</sup>. В целом выявлен высокий уровень согласованности распределения глубины залегания максимума Совв в сероводородной зоне с распределением слоя изопикнических 16–16,4 кг/м<sup>3</sup> поверхностей c величинами R, превышающими 0,9 (рисунок 3.22, ж) [11].

Сопоставление осредненных по всей акватории профилей  $C_{obb}$  и температуры показало положительную корреляцию (R ~ 0,5) в пределах ВКС и под термоклином (R ~ 0,45), вплоть до глубины залегания ХПС (рисунок 3.23, а). Глубже ХПС между  $C_{obb}$  и температурой линейная корреляция была отрицательной. Между  $C_{obb}$  и соленостью, а также  $C_{obb}$  и плотностью во всей толщи линейные связи были отрицательными, наиболее высокая связь была отмечена в ВКС (рисунок 3.23, б, в).





Рисунок 3.22 – а – осредненный по всем станциям вертикальный профиль С<sub>овв</sub> (мг/л) в слое 100–180 м; б – зависимость величин С<sub>овв</sub> (мг/л) от плотности (кг/м<sup>3</sup>); графики линейной связи между глубинами залегания различных изопикн (HP(15,5; 16,2; 16,3; 16,6 кг/м<sup>3</sup>), м) и максимума С<sub>овв</sub> (мг/л): в – в субкислородной зоне; г – на верхней границе сероводородной зоны; г, д – в сероводородной зоне; ж – изменение величины R между глубинами залегания максимума С<sub>овв</sub> и различных изопикн. Штриховые линии – границы 95%-го доверительного интервала



Рисунок 3.23 – Средние по полигону вертикальные распределения: а – температуры (T, °C) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); б – солености (S, ЕПС) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); условной плотности (P, кг/м<sup>3</sup>) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л). Серые области – распределения коэффициентов линейной корреляции R между пространственными распределениями соответствующих параметров по глубине. Штриховые линии – доверительные интервалы 95%-

ной значимости

**3.1.4.4 Осенняя съемка 2018 года (28.08–18.09.2018).** Пространственное распределение Совв ранней осенью 2018 г. [112, 117] в поверхностном слое характеризовалось следующими крупномасштабными особенностями (рисунок 3.24, а). Изменчивость концентрации взвешенного вещества В исследуемой акватории варьировала в диапазоне 0,3–1,2 мг/л, при этом минимальные концентрации (не выше 0,45 мг/л) наблюдались в западной части полигона, за исключением некоторых участков у берегов Крымского полуострова. В восточной части съемки, особенно у берегов Кавказа, отмечались более концентрации OBB (> 0,6 мг/л), высокие которые обусловлены вдольбереговым переносом Основным черноморским течением мутных и распресненных вод стока Риони и других рек (рисунок 3.24, б). Значения мутности постепенно уменьшались по мере удаления от берегов Кавказа. Вместе с тем, в мористой части съемки наблюдалось отдельное обширное пятно повышенных значений Совв, происхождение которого связано с особенностями циркуляции вод в этом районе. Согласно карте динамической топографии (рисунок 3.24, в) И распределению векторов течений (рисунок 3.24, г), это пятно располагалось на северо-западной периферии крупномасштабного Восточного циклонического круговорота и формировалось в результате выноса в открытое море более мутных прибрежных вод ветвью ОЧТ.

Самые высокие значения концентрации взвеси (до 1,25 мг/л) выявлены, как и во многих других съемках, в прибрежной зоне к югу от Керченского полуострова. Основной причиной, обусловившей такие высокие концентрации, явилось то, что в период проведения измерений в этом относительно мелководном районе под воздействием интенсивного шторма произошло взмучивание донной и береговой взвеси. Кроме того, вклад в формирование этого максимума вносили мутные и низкосоленые Азовоморские воды, которые, судя по повышенным значениям концентрации взвеси и низким значениям поверхностной солености, поступали из района Керченского пролива (рисунок 3.24, а, б) [117].



Рисунок 3.24 – Распределение: а – концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) в слое 4–5 м; б – солености (S, ЕПС) на горизонте 1 м; в – динамической топографии; г – векторов инструментально измеренных течений (см/с) на горизонте 30 м

Распределения глубин залегания максимума концентрации ОВВ и максимума по абсолютной величине вертикального градиента температуры качественно показывают одинаковые пространственные особенности (рисунок 3.25, a, б).

Увеличение глубины залегания максимумов обоих параметров (до 30– 35 м) наблюдалось практически вдоль всего побережья. Максимальные глубины (40–45 м) прослеживались к западу от Гераклейского полуострова, где по данным геострофических расчетов и инструментальных измерений течений был зафиксирован антициклонический круговорот (рисунок 3.25, в, г). Минимальные глубины залегания (до 5–10 м) отмечались в открытой глубоководной части съемки ближе к центральной части крупномасштабного Восточного циклонического круговорота [117].



а



Рисунок 3.25 – Распределение: а – глубины залегания максимума концентрации OBB (НС<sub>овв</sub>макс, м); б – глубины залегания максимального вертикального градиента температуры (Н ВГТмакс, м); в – максимального вертикального значения концентрации ОВВ (Соввмакс, мг/л); г – максимального вертикального градиента температуры (ВГТмакс, °С)

В начале осени вертикальная стратификация взвешенного вещества была близка к летнему периоду и характеризовалась наличием выраженного ВКС и максимума концентрации ОВВ в термоклине. Значения коэффициентов линейной корреляции между осредненными по всей акватории профилями Совв профилями температуры, солености и плотности не превышали 0,5 И (рисунок 3.26) [117].



Рисунок 3.26 – Средние по полигону вертикальные распределения: а – температуры (T, °C) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); б – солености (S, EПC) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л); условной плотности (P, кг/м<sup>3</sup>) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л). Серые области – распределения коэффициентов линейной корреляции R между пространственными распределениями соответствующих параметров по глубине. Штриховые линии – доверительные интервалы 95%ной значимости

### 3.1.5 Зимние съемки.

**3.1.5.1 Зимняя съемка 2020 года (27.11–16.12.2020).** В начале зимы диапазон изменчивости концентрации общего взвешенного вещества В варьировал 0,3-4,2 мг/л поверхностном слое В широких приделах (рисунок 3.27, а). Максимальные значения Совв (> 2,5 мг/л) наблюдались в Феодосийском заливе и южнее Керченского полуострова (Рисунок 3.27, а). Здесь отмечалось заметное понижение температуры (< 11°C) и солености (< 18,6 ЕПС) (рисунок 3.27, б, в). Высокие значения концентрации взвешенного

вещества в заливе были обусловлены поступлением азовских вод, переносимых Основным черноморским течением из района Керченского пролива, а также взмучиванием донной и береговой взвеси под воздействием штормовых условий.



Рисунок 3.27 – Распределение: а – концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) в слое 4–5 м; б – температуры (Т, °С) на горизонте 1 м; в – солености (S, ЕПС) на горизонте 1 м; г – векторов геострофических течений (см/с) на горизонте 30 м, рассчитанные относительно поверхности 300 м

В целом в поверхностном слое вся восточная часть полигона была занята более холодными и менее солеными водами с повышенными значениями концентрации OBB. С одной стороны, это обусловлено тем, что восточная часть съемки выполнялась в условиях более интенсивного сезонного охлаждения, с другой, выносом, судя по конфигурации изотерм и изохалин, прибрежных более холодных и менее соленых вод в открытое море под воздействием ветров северных румбов. Это подтверждается распределением векторов геострофических течений, которое показывает, что южнее восточного Крыма и Керченского полуострова прослеживался крупномасштабный циклонический меандр, на западной периферии которого наблюдались течения, переносящие поверхностные водные массы в южном и юго-западном направлениях (рисунок 3.27, г).

Результаты съемки позволили выявить некоторые особенности вертикального распределения гидрологических и гидрооптических параметров в зимний период. На осредненных по всем станциям вертикальных профилях температуры, солености, плотности и  $C_{oBB}$  четко прослеживался верхний квазиоднородный слой. Вертикальная мощность ВКС для разных параметров заметно изменялась и составляла в поле температуры около 20–25 м (рисунок 3.28, а), в поле солености – около 40–45 м (рисунок 3.28, б), в поле плотности – 25–30 м (рисунок 3.28, в), в поле  $C_{oBB}$  – 15–20 м (рисунок 3.28).

Глубже ВКС располагался слой высоких вертикальных градиентов. Термоклин наблюдался между 25 м и 50 м, галоклин и пикноклин соответственно в слоях 45–100 м и 20–100 м. В поле температуры был хорошо выражен холодный промежуточный слой, ядро которого располагалось на глубине 85–95 м. В поле С<sub>овв</sub> высокие вертикальные градиенты прослеживались в слое 20–45 м, в пределах которого наблюдались три «ступени» (на горизонтах 22, 35 и 45 м) с максимально резким изменением С<sub>овв</sub> по вертикали.

Выявлено, что между значениями  $C_{obb}$  и температуры и солености наиболее значимые линейные связи с величинами коэффициента корреляции R, превышающими по абсолютной величине 0,75, прослеживались в ВКС (рисунок 3.28, а, б). Между температурой, соленостью и  $C_{obb}$  наблюдалась отрицательная корреляция, а между плотностью и  $C_{obb}$  – положительная (рисунок 3.28, в). Т.е. в пределах ВКС в горизонтальных распределениях более высокие концентрации  $C_{obb}$  были приурочены к водам с более низкими температурой и соленостью и более высокой плотностью. Отметим, что связь



С<sub>овв</sub> с полем плотности была заметно ниже, чем с полями температуры и солености (рисунок 3.28).

Рисунок 3.28 – Средние по полигону вертикальные распределения: а – температуры (T, °C) и концентрации ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л); б – солености (S, ЕПС) и концентрации ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л); условной плотности (P, кг/м<sup>3</sup>) и концентрации

ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л). Серые области – распределения коэффициентов линейной корреляции R между пространственными распределениями соответствующих параметров по глубине. Штриховые линии – доверительные интервалы 95%-ной значимости

Минимальные значения коэффициентов линейной связи между  $C_{obb}$  и температурой наблюдались ниже ВКС в диапазоне глубин 30–50 м, где располагался основной термоклин (рисунок 3.28, а). При этом глубже примерно 35 м линейная связь становилась прямой, глубже 70 м – значимой с величинами R ~ 0,75–0,8. Характерно, что на глубине залегания ядра ХПС (85–95 м) коэффициенты линейной связи несколько уменьшались, что, вероятно, обусловлено тем, что в слое минимума структура поля температуры более однородна и величины  $C_{obb}$  в меньшей степени связаны с ее пространственными изменениями.

В поле солености ВКС был мощнее и высокие отрицательные значения коэффициента линейной связи (R ~ 0,9) прослеживались до глубины почти 35 м (рисунок 3.28, б). Глубже, между глубинами 45 м и 95 м, т.е. практически во всем слое главного галоклина, значения коэффициента линейной связи были относительно низкими, и только ближе к нижним горизонтам измерений связь становилась значимой (R ~ 0,75). В отличие от поля температуры во всем слое измерений линейная корреляция была обратной, т.е. увеличение солености сопровождалось уменьшением концентрации взвешенного вещества.

Между С<sub>овв</sub> и плотностью в ВКС, который имел толщину около 30 м, наблюдались положительные коэффициенты линейной связи, в отличие от температуры и солености (рисунок 3.28, в). При относительно низких значениях положительных коэффициентов линейной связи в ВКС на глубине около 20 м наблюдался их максимум (R ~ 0,5), который располагался выше верхней границы пикноклина. В основном пикнолине, глубже примерно 35 м, коэффициенты линейной связи становились отрицательными и несколько увеличивались, на нижних горизонтах измерений их значения достигали – 0,75 (рисунок 3.28, в).

### 3.2 Обобщение полученных особенностей

3.2.1 Пространственная изменчивость. Подробный анализ распределений оптических и гидрологических характеристик по данным конкретных съемок, приведенный выше, показал, что каждое из этих распределений представляет достаточно сложную картину, которая является результатом наложения нескольких типов изменчивости: внутрисуточной, синоптической, сезонной и межгодовой. Кроме того, на общую картину оказывает влияние порядок и несинхронность выполнения съемки. Вместе с тем проведенный анализ полученных распределений позволил выделить некоторые общие закономерности, которые можно объяснить влиянием временной физических механизмов, не зависящих OT изменчивости гидрологических и оптических параметров [129].

Анализ горизонтальных распределений С<sub>овв</sub> в поверхностном слое позволил выявить некоторые общие закономерности, которые можно объяснить особенностями гидрологической структуры вод. В пределах полигонов выделяются несколько областей с экстремальным значениями С<sub>овв</sub>, появление которых связано с наличием очагов формирования различных водных масс. Практически во всех съемках, вне зависимости от года и сезона, к югу от Керченского пролива и Керченского полуострова наблюдалась область повышенных значений С<sub>овв</sub>, образование которой связано с выносом более мутных и распресненных азовоморских вод через Керченский пролив. Эти воды, согласно данным инструментальных измерений течений, периодически переносятся ОЧТ в западном направлении вдоль берегов Крыма.

Еще одна область высоких значений С<sub>овв</sub> наблюдалась в восточной части Черного моря вдоль берегов Кавказа. Она формировалась в результате переноса вдольбереговым потоком ОЧТ на северо-запад мутных и распресненных вод стоков Риони, Ингури и других более мелких рек, а также в результате более высокой продуктивности вод восточной части Черного моря. Под влиянием особенностей циркуляции вод пятна высоких значений С<sub>овв</sub> иногда

прослеживались не только вблизи Кавказского побережья, но и в открытом море.

Помимо вышеперечисленных областей высоких значений концентрации OBB, в глубоководной части полигона могут прослеживаться локальные области мутных вод, возникновение которых явно не связано с речным стоком или адвекцией прибрежных вод в открытое море. Появление подобных областей можно объяснить особенностями вертикальной циркуляции в зонах циклонических круговоротов и меандров. В отличие от прибрежных вод повышенной мутности и низкой солености, воды с повышенной концентрацией OBB в зонах этих меандров характеризовались повышением солености на поверхности. Такое повышение мутности и солености связано с подъемом более соленых подповерхностных вод и подповерхностного максимума концентрации OBB, что привело к повышению значений С<sub>овв</sub> и солености у поверхности. В целом по данным всех съемок в глубоководной части акватории концентрация OBB понижалась по мере удаления от прибрежных источников мутных вод, при этом соленость, как правило, увеличивалась [11].

В вертикальном распределении коэффициентов линейной корреляции R между Совв и термохалинными параметрами на отдельных горизонтах с дискретностью 1 м по вертикали, выявлено наличие устойчивого минимума, который располагается примерно у нижней границы ВКС или в термоклине. При этом знак связи выше или ниже этого минимума от съемки к съемке преимущественно сохраняется. Так из таблицы 3.1 видно, что в пределах ВКС, в среднем по акватории, между Совв и температурой, а также между Совв и соленостью преобладают отрицательные линейные связи, а между Совв и плотностью – положительные. Таким образом, более холодные и менее соленые воды, как правило, имели повышенную мутность. Это связано с тем, что в более холодных водах, приуроченных преимущественно к открытым частям моря, а также к апвеллингам происходит более активное развитие организмов Однако биологического происхождения. В ЭТОМ случае соленость В поверхностном слое моря увеличивается. В менее соленых водах увеличение

концентрации OBB происходит в основном в прибрежных районах, где значительную роль играет речной сток, обогащенный фракциями терригенного происхождения. Этот фактор является преобладающим в целом по акватории, поэтому между  $C_{obb}$  и соленостью отмечаются отрицательные линейные связи [11].

Таблица 3.1 – Знаки корреляции между осредненными по полигону вертикальными распределениями температуры и С<sub>овв</sub> (T – С<sub>овв</sub>), солености и С<sub>овв</sub> (S – С<sub>овв</sub>), условной плотности и С<sub>овв</sub> (P – С<sub>овв</sub>) для ВСК и термоклина.

		Знак корреляции R						
Слой	Корреляция R	Весна	Лето	Осень	Зима			
	T – C	-	-	-	-			
	I C <sub>OBB</sub>	+	-	-	+			
ВКС			-	+				
	S C	Н	-	-	-			
	$S - C_{OBB}$	-	-	-	-			
			+	-				
	P-C	+	+	+	+			
	I C <sub>OBB</sub>	-	+	+	-			
			+	-				
Термоклин	T - C	+	+	+	+			
	I COBB	+	+	+	+			
			+	+				
1	S - C	Н	-	-	-			
	$\mathbf{D} = \mathbf{C}_{OBB}$	-	-	-	-			
			-	-				
	P-C	-	-	-	-			
	I COBB	-	-	-	+			
			-	-				

Ниже основного минимума R в термоклине отмечаются положительные линейные связи между С<sub>овв</sub> и температурой. Это свидетельствует о том, что на

этих глубинах в горизонтальных распределениях более теплые пятна совпадают с повышенными значениями С<sub>овв</sub>, и подъем и опускание определенных изотерм сопровождается подобным же поведением изоповерхностей концентраций С<sub>овв</sub>. Аналогичная, но обратная по знаку связь, наблюдается между С<sub>овв</sub> и полями солености и плотности. В нижнем слое значимая связь обусловливается квазисинхронным смещением по вертикали слоев с повышенными значениями концентрации общего взвешенного вещества и температуры и пониженными значениями солености.

OBB распределений Анализ вертикальных концентрации И термохалинных параметров позволил выявить и другие общие закономерности. Распределения вертикальных градиентов температуры, солености и плотности показали, что глубина залегания подповерхностного максимума концентрации ОВВ хорошо совпадала с глубиной залегания максимальных значений (по абсолютной величине) вертикальных градиентов температуры и плотности. Кроме того, установлено, что толщина подповерхностного слоя с высокими значениями концентрации ОВВ, более чем в 1,5 раза превышающими значения Совв в выше- и нижележащих слоях, зависит от абсолютной величины градиента температуры. В областях, вертикального где наблюдался максимальный вертикальный градиент температуры, толщина слоя с высоким содержанием общего взвешенного вещества уменьшалась почти на порядок по сравнению с районами, где градиент температуры был слабо выражен (рисунки 3.29, 3.30). Между толщиной слоя с максимальной концентрацией ОВВ и величиной максимального вертикального градиента температуры выявлена значимая линейная корреляция (рисунок 3.31) [11].



Рисунок 3.29 – Вертикальные распределения температуры (T, °C), солености (S, ЕПС), плотности (P, кг/м<sup>3</sup>) и концентрации OBB (С<sub>овв</sub>, мг/л)



Рисунок 3.30 – Распределение: а – величины максимального градиента температуры (ВГТмакс, °С); б – толщины слоя с максимальными значениями концентрации ОВВ (толщина слоя С<sub>овв</sub>макс, м)



Рисунок 3.31 – Зависимость толщины слоя с максимальными концентрациями ОВВ (HC<sub>овв</sub>макс, м) от максимального вертикального градиента температуры (ВГТ макс, °С)

Глубже подповерхностного максимума концентрации ОВВ наблюдалось ее постепенное уменьшение. В слое примерно 75–120 м по данным всех съемок прослеживался промежуточный минимум  $C_{obb}$ , глубина залегания которого заметно изменялась в зависимости от сезона и варьировала в пределах от 75–95 м в конце осени, зимой и весной до 100–117 м летом и в начале осени. Этот минимум  $C_{obb}$  прослеживался ниже глубины залегания минимума температуры (ядра холодного промежуточного слоя), которая составляла 70–90 м, и располагался в слое основных термоклина, галоклина и пикноклина. В целом между глубинами залегания ядра ХПС и промежуточного минимума  $C_{obb}$  выявлена значимая линейная связь (рисунок 3.32) [11].



Рисунок 3.32 – Зависимость между глубинами залегания ядра ХПС и промежуточного минимума С<sub>овв</sub> по данным зимней съемки 2017 г. Штриховые линии – границы 95%-го доверительного интервала.

Под промежуточным минимумом концентрация ОВВ снова возрастала, глубинах более 100–170 м на вертикальных при ЭТОМ на профилях прослеживался ряд максимумов Совв. При переходе от глубоководной части моря к материковому склону наблюдалась тенденция, как увеличения глубины залегания этого максимума, так и самих значений Совв (рисунок 3.33). Анализ вертикальной структуры поля плотности показал, что наибольшее увеличение наблюдается содержания взвешенных веществ В слое залегания изопикнических поверхностей 16,15–16,35 кг/м<sup>3</sup>, который охватывает нижнюю границу субкислородной редокс-зоны и верхний слой сероводородной зоны, верхняя граница которой условно определяется по положению изопикны 16,2 кг/м<sup>3</sup> [11].



Рисунок 3.33 – Зависимость концентрации ОВВ (С<sub>овв</sub>, мг/л) от глубины сероводородного слоя максимальных значений ОВВ

**3.2.2 Сезонная изменчивость.** В распределениях концентрации ОВВ и гидрологических характеристик, полученных по данным съемок, выполненных в разное время года, несмотря на присутствие синоптической и межгодовой изменчивости, наблюдаются различия, особенно четко проявляющиеся в пределах верхнего квазиоднородного слоя, которые можно объяснить сезонными изменениями.

В весенний период (апрель – май) отмечается невысокое содержание общего взвешенного вещества ( $C_{OBB} \sim 0,3-0,5$  мг/л) на большей части исследованной акватории (таблица 3.2). Горизонтальное поверхностное распределение значений  $C_{OBB}$  характеризуется квази-однородностью, за исключением района Керченского полуострова. Здесь величины  $C_{OBB}$  были максимальны и достигали 1,3 мг/л в мае 2017 г. и 1,2 мг/л в мае 2019 г. Это увеличение  $C_{OBB}$  было связано как с поступлением через Керченский пролив более мутных азовоморских вод, так и с процессами взмучивания в мелководных участках акватории. Наиболее прозрачная вода с низким

содержанием общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub> ~ 0,3 мг/л) отмечалась в северо-западной части полигона.

	Весна			Лето			Зима		
Район	2017	2019	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2020
Вся акватория	0,4–	0,35-	0,4–	0,4–	0,4–	0,15-	0,12-	0,3–	0,2–
	1,3	1,2	0,9	1,5	0,9	2,2	0,9	1,2	4,2
Северо-	0,4–	0,35-	0,55-	0,4–		0,15-	0,12-	0,3–	0,2–
западная часть	0,5	0,5	0,9	1,2		0,2	0,25	0,4	0,6
Глубоководная	0,4–	0,36–	0,5-	0,9–	0,4–	0,15-	0,18–	0,3–	0,3–
часть	0,6	0,5	0,9	1,2	0,9	0,3	0,3	0,5	0,8
Юг	до	до	до	до	до	до	до	до	до
Керченского	1,3	1,2	0,9	1,5	0,8	2,2	0,9	1,2	4,2
полуострова									

Таблица 3.2 – Осредненные значения С<sub>овв</sub> для различных районов исследованной акватории северной части Черного моря.

Вертикальная стратификация С<sub>овв</sub> в конце апреля – начале мая слабо выражена.

В летний период наблюдалось более высокое содержание OBB, чем в другие сезоны (таблица 3.2, за исключением акватории юга Керченского полуострова). Увеличение содержания общего взвешенного вещества и его неоднородное распределение в летний период связано с особенностями развития фитопланктона (весенне-летний пик цветения фитопланктона, наблюдаемый в период наиболее интенсивного прогрева вод) (рисунок 3.34).

В вертикальном распределении С<sub>овв</sub> летом наблюдается устойчивая стратификация вод, характеризующаяся наличием верхнего оптически однородного слоя, совпадающего с ВКС, и увеличением содержания ОВВ в термоклине. В вертикальном распределении гидрологических параметров и

OBB наблюдается высокая корреляция между ними. Выявлено, что летом глубина залегания максимумов С<sub>овв</sub> совпадает с нижней границей ВКС.





В первой половине осени в распределении С<sub>овв</sub> наблюдается подобная весеннему периоду ситуация, характеризующаяся низким содержанием OBB на большей части акватории и повышенными значениями С<sub>овв</sub> в районе Керченского полуострова (таблица 3.2). Отличием от весеннего периода является наличие в вертикальном распределении выраженного подповерхностного максимума в районе термоклина. Со временем, ближе к зиме, после интенсивного выхолаживания воды, этот максимум ослабевает.

Зимой, в целом по полигону, наблюдалась высокая изменчивость концентрации взвешенного вещества, которая наиболее выражена была в восточной его части. Одним из основных факторов высокого содержания С<sub>овв</sub> южнее Керченского полуострова в зимний период является взмучивание

донных отложение за счет мощных штормов. Следует отметить, что увеличение  $C_{obb}$  в восточной части полигона, вероятнее всего, связано с зимним цветением фитопланктона в Черном море (зимний пик цветения фитопланктона). Зимой отмечаются самые высокие коэффициенты линейной корреляции между  $C_{obb}$  и гидрологическими параметрами. В ВКС наблюдается максимальная отрицательная корреляция (R доходит до 0,99) на отдельных горизонтах с дискретностью 1 м по вертикали между  $C_{obb}$  и температурой, и чуть меньшая (R до 0,8) корреляция между  $C_{obb}$  и соленостью.

Получено, что сезонная изменчивость проявляется и в характеристиках подповерхностного максимума скопления ОВВ. Так, наибольшая глубина расположения максимума Совв наблюдалась в осенний период, при этом значения Совв в максимуме были минимальные. Минимальная глубина расположения максимума Совв отмечается в весенний и зимний периоды. В летний период глубина залегания максимума Совв заглублялась по отношению к весеннему и зимнему сезонам и была близка к осеннему периоду. При этом значения Совв в максимуме летом были более чем в два раза выше, чем осенью. В таблице 3.3 представлены осредненные по каждой съемке и по сезонам максимума глубины залегания  $C_{OBB}$ , основного а также значения гидрооптических и гидрологических параметров в нем.

В целом в летне-осенний период между глубинами залегания подповерхностного максимума С<sub>овв</sub> и максимумов вертикальных градиентов температуры и плотности выявлен высокий уровень линейных связей (таблица 3.4) [11].

	Bee	сна		Лето			Осень		Зима
Параметр	2017	2019	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2020
Глубина залегания	8	2	13	11	10	20	16	15	8
максимума С <sub>овв</sub> , м									
Среднее значение	5		11			17			8
С <sub>овв</sub> в максимуме,	0,64	0,76	1,46	1,18	0,56	0,43	0,69	0,29	0,63
мг/л									
Среднее значение	0,7		1,07			0,47			0,63
Температура в	10	13,4	19	17	19	18	18,5	13	11,7
максимуме, °С									
Среднее значение	11,7		18,3			16,3			11,7
Соленость в	18,32	17,9	18,02	18,3	18,1	18,22	18,18	18,4	18,5
максимуме, ЕПС				3					
Среднее значение	18	,11		18,15			18,27		18,5

Таблица 3.3 – Осредненные глубины залегания основного максимума С<sub>овв</sub>, а также значения С<sub>овв</sub>, температуры и солености в нем.

Таблица 3.4 – Величины коэффициентов линейной корреляции R между глубинами залегания подповерхностного максимума С<sub>овв</sub> и максимумов ВГТ (R(HC<sub>овв</sub>макс – H ВГТмакс)) и ВГП (R(HC<sub>овв</sub>макс – H ВГПмакс)). Значимые на 95%-ном уровне величины R выделены жирным.

Параметр	Весна		Лето			Осень			Зима	
	2017	2019	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2018	2020
R(HC <sub>овв</sub> макс –	0,32	0,94	0,91	0,65	0,9	0,82	0,33	0,82	0,1	0,35
Н ВГТмакс)										
R(HC <sub>OBB</sub> max –	0,35	0,95	0,91	0,65	0,74	0,79	0,35	0,83	0,1	0,25
Н ВГПмакс)										

### Выводы к разделу 3

Подробные гидрооптические съемки с высокой пространственной дискретностью, выполненные по одной и той же сетке, позволили уточнить

особенности горизонтальной и вертикальной структуры гидрооптических полей и оценить их связь с гидрологическими характеристиками [11].

Показано, что основными источниками повышенной концентрации общего взвешенного вещества в поверхностном слое северной части Черного моря являются низкосоленые и мутные воды, поступающие из Керченского пролива, воды стоков Риони, Ингури и других рек на востоке акватории и распресненные воды Днепра, Днестра и Дуная, проникающие на акваторию съемок с северо-западного шельфа. В глубоководной части полигонов съемок могут прослеживаться локальные области мутных вод, возникновение которых связано с особенностями вертикальной циркуляции в зонах циклонических круговоротов и меандров Основного черноморского течения. В отличие от прибрежных вод повышенной мутности и низкой солености, воды с повышенной концентрацией ОВВ в зонах этих меандров характеризовались повышением солености на поверхности [11, 49, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117].

Установлено, что в пределах верхнего квазиоднородного слоя между пространственными распределениями С<sub>овв</sub>, температуры и солености выявлена значимая отрицательная линейная корреляция, а между распределениями С<sub>овв</sub> и плотности – положительная [11].

Показано, что вертикальная толщина ВКС в поле Совв, как правило, совпадала с толщиной ВКС в полях термохалинных параметров. Глубже ВКС прослеживался основной максимум концентрации ОВВ, наиболее четко выраженный летом и осенью. Глубина залегания этого максимума совпадала с глубиной залегания максимальных значений (по абсолютной величине) вертикальных температуры Толшина градиентов И плотности. подповерхностного слоя с высокими значениями концентрации ОВВ зависела от абсолютной величины вертикального градиента температуры. В областях, где наблюдался максимальный вертикальный градиент температуры, толщина слоя с высоким содержанием общего взвешенного вещества уменьшалась почти на порядок по сравнению с районами, где градиент температуры был слабо выражен. Таким образом, выраженные вертикальные градиенты гидрологических параметров являются неким барьером для перемещения OBB по вертикали, задерживая OBB в этих слоях [11].

Ниже глубины залегания ядра холодного промежуточного слоя в слое основных термоклина, галоклина и пикноклина прослеживался промежуточный минимум  $C_{obb}$ . Под промежуточным минимумом концентрация OBB снова возрастала и на глубинах более 120–130 м прослеживался еще один максимум  $C_{obb}$ , располагающийся в верхнем слое сероводородной зоны. Пространственное распределение глубины залегания этого максимума наиболее четко согласуется с распределением глубины залегания изопикн 16,1–16,3 мг/м<sup>3</sup> [11].

## РАЗДЕЛ 4 ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОД ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ КРЫМА И ЕЕ СВЯЗЬ С ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ И БИОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

# 4.1 Гидрооптические исследования в прибрежных акваториях Гераклейского полуострова

Анализ результатов проведенных исследований, комплексных выполненных в ходе шести экспедиций В прибрежных акваториях особенностей Гераклейского полуострова, позволил выявить ряд в распределениях гидрооптических характеристик и определить основные факторы, влияющие на эти распределения.

Пространственные распределения показателя ослабления направленного света, как косвенного индикатора чистоты вод, показали, что во всех проведенных экспедициях за период с 2015 по 2016 гг. существовал интенсивный подводный источник поступления на акваторию загрязняющих веществ. На рисунке 4.1 представлено поверхностное распределение ПОС в спектральном участке 370 нм для съемок, выполненных 29.07.2015 г., 10.09.2015 г. и 31.07.2015 г. Получено, что значения показателя ослабления направленного света поверхностных вод в мористой части исследуемой акватории соответствовали величинам этого параметра в глубоководной части Черного моря, а ближе к берегу, в районе магистрали сбросных устройств очистных сооружений, регулярно наблюдался подводный слой мутных вод (со значительно повышенными значениями ПОС). В период проведения съемок мутные опресненные воды практически во всех случаях проявлялись на поверхности в виде плюма, так как они легче окружающих более соленых вод, а различные примеси, в основном органические взвешенные вещества, задерживались в области максимального градиента плотности [104, 105, 107]. Отмечается, что расположение поверхностных плюмов несколько изменялось



от съемки к съемке, что было обусловлено динамикой вод и особенностями гидрологического режима в каждой из съемок.

Рисунок 4.1 – Пространственное распределение показателя ослабления направленного света на 370 нм ( $\varepsilon_{370}$ , м<sup>-1</sup>) в поверхностном слое для съемок, выполненных: а – 29.07.2015 г.; б – 10.09.2015 г.; в – 31.07.2015 г.

По данным исследований получена зависимость глубины залегания слоя максимально мутных вод от глубины пикноклина. Данная зависимость,

построенная по всему массиву данных, приведена на рисунке 4.2, а. Как следует из рисунка 4.2, а, наблюдаемые наиболее мутные воды всегда располагаются в слое пикноклина. Отмечено, что в прибрежной акватории Гераклейского полуострова глубина залегания пикноклина существенно изменялась, как от экспедиции к экспедиции, так и в различные дни в пределах одной экспедиции, соответственно изменялась и глубина залегания мутных слоев [138].

Выявлено, что в слоях повышенной мутности наблюдается понижение солености и температуры воды. На рисунке 4.2, б представлено вертикальное распределение для случая, когда в пикноклине и над ним наблюдались слои повышенной мутности. В пикноклине температура воды была на 1°С, а соленость на 0,2 ЕПС ниже фоновых значений. В слое над пикноклином, где наблюдался более слабо выраженный мутный слой, также прослеживалось аналогичное понижение солености И температуры воды. Понижение температуры воды в мутных слоях объясняется тем, что эти воды поднимаются к поверхности со дна и, соответственно, имеют температуру, близкую к придонному слою.

На рисунке 4.2, в приведены вертикальные профили температуры и солености в районе выхода мутных вод на поверхность. Зондирование было начато непосредственно в пятне выхода мутных вод на поверхность. Профили, полученные при зондировании вниз, демонстрируют уменьшение температуры воды на 2°С и уменьшение солености на 0,2 ЕПС в верхнем слое от поверхности до глубины 13,5 м. При зондировании вверх через несколько минут судно уже вышло из области пятна из-за ветрового дрейфа, и полученные профили соответствовали фоновым. Понижение температуры и солености в слоях мутных вод иллюстрирует рисунок 4.2, б, в.



Рисунок 4.2. – а – связь глубины основного слоя мутных вод с глубиной пикноклина; б – вертикальные распределения показателя ослабления направленного света на 370 нм ( $\varepsilon_{370}$ , м<sup>-1</sup>), условной плотности (P, кг/м<sup>3</sup>), температуры (T, °C), солености (S, ЕПС); в – вертикальные распределения температуры (T, °C) и соленость (S, ЕПС) в пятне выхода мутных вод на поверхность

Анализ спектрального распределения показателя ослабления направленного света в районе выхода сточных вод и в фоновых водах позволил выявить ряд особенностей. На рисунке 4.3, а представлены спектральные распределения показателя ослабления направленного света для случая, когда слой локализации стоков располагался на глубинах 15-20 м. В данном случае значения ПОС в мутном загрязненном слое во всех спектральных каналах в 3 и более превышали значения параметра В фоновых раз ЭТОГО водах (рисунок 4.3, а). Возрастание величин показателя ослабления направленного света в слое повышенной мутности в сине-фиолетовой области видимого участка спектра означало повышенное содержание растворенного в воде органического вещества, а возрастание в красной области свидетельствовало о повышенном содержание общего взвешенного вещества [139]. Вертикальный профиль ПОС для данного случая вместе с кадрами подводной видеосъемки (видеокамера была закреплена на тросе при выполнении зондирования) представлены на рисунке 4.3, б. Видеосъемка явно продемонстрировала мутные воды внутри слоя на фоне прозрачных вод выше и ниже слоя.



Рисунок 4.3 – а – спектральные распределения показателя ослабления направленного света (є, м<sup>-1</sup>): 1 – поверхностный слой, 2 – глубинные воды, 3 – слой максимальных значений ПОС; б – вертикальное распределение показателя ослабления направленного света (є, м<sup>-1</sup>) и кадры видеосъемки на глубинах,

указанных стрелками

Обобщенный анализ результатов обработки натурных гидрооптических данных, полученных в серии подспутниковых экспериментов, показал, что мутный слой обычно проявляется в пределах области с горизонтальным размером 0,5–1 км. Эта область была выявлена на расстоянии ~ 1 км от берега.

Учитывая постоянство появления загрязнений в данном районе, а также их приуроченность к сбросовому устройству (но не к его окончанию по протяженности), можно утверждать, что они обусловлены всплытием глубинных стоков, поступающих из пробоины в коллекторе. Вывод о том, что сбросовое устройство имеет повреждения, подтверждается также И результатами обработки космических данных.

Обобщенная карта зон загрязнений, обнаруженных по космическим оптическим многоспектральным изображениям в районе коллектора сбросового устройства очистных сооружений у г. Севастополь, приведена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Сводная карта загрязнений, сформированная по результатам обработки космических оптических многоспектральных изображений, полученных в период с 17 мая 2014 г. по 12 сентября 2016 г. в районе расположения коллектора сбросового устройства очистных сооружений у г. Севастополь

На этой карте полигонами, окрашенными в различные цвета в зависимости от дат съемки (см. условные обозначения), обозначены зоны антропогенных загрязнений, вызванные глубинными стоками. Анализ взаимного расположения коллектора сбросового устройства и выявленных зон загрязнения показывает, что загрязнения распространялись преимущественно вдоль берега, как на северо-запад, так и на юго-восток.

В ходе проведения экспериментов были выявлены случаи абсолютно синхронной фиксации поверхностных проявлений глубинных стоков контактными и космическими методами. На рисунке 4.5 в одинаковых масштабах показаны: *а* – фрагмент космического многоспектрального изображения, полученного со спутника GeoEye 10 сентября 2015 г. (синтез в реальных цветах с эквализованной гистограммой яркостей), с проявлением оптической аномалии В районе разрыва коллектора; б – результат дешифрирования границ аномалии а на картографической подложке; в – двумерное распределение ПОС на длине волны 370 нм для глубин 0-5 м. Анализ рисунка 4.5 показал, что имеется высокая степень соответствия результатов обнаружения зон антропогенных воздействий в ходе обработки космических и подспутниковых данных.



Рисунок 4.5 – Пример сопоставления результатов обработки космических (а) и контактных (б, в) данных для акватории в районе расположения глубинного стока у г. Севастополь

### 4.2. Гидрооптические исследования в заливе Сиваш

**4.2.1 Объем работ.** Усилиями Морского гидрофизического института в 2013–2020 гг. впервые были выполнены исследования пространственновременной изменчивости содержания общего взвешенного вещества в заливе Сиваш. Кроме того, в некоторых съемках брались пробы на определения содержания растворенного органического вещества.

Было выполнено 10 биооптических съемок в весенне-летний и осенний сезоны. Проведенные исследования позволили оценить особенности, в основном, синоптической изменчивости поля OBB, сделать некоторые косвенные выводы о его межгодовой изменчивости.

#### 4.2.2 Результаты отдельных съемок.

**4.2.2.1 Съемка 14–18.06.2013 г.** В июне 2013 г. содержание общего взвешенного вещества вдоль Сивашского берега Арабатской стрелки изменялось в интервале от 1,0 до 7,8 мг/л, со средним значением – 3,47 мг/л (рисунок 4.6). В целом, в этом районе отмечалось достаточно однородное распределение взвешенного вещества с низкими значениями (1–4 мг/л).

Аномальные ситуации были отмечены на двух станциях – ст.10, расположенной в нескольких километрах южнее пролива Тонкий, и на ст.2. в южной части Сиваша. На этих станциях отмечались максимальные величины концентрации взвешенного вещества (7,8 мг/л и 7,6 мг/л соответственно). Отметим, что на этих станциях наблюдались аномальные значения солености. На ст.10 был отмечен скачок солености до 39,18 ЕПС. Этот локальный максимум был зафиксирован в водах обширного мелководного (глубина 10–15 см) залива. Возможная причина его формирования – испарение с локализованного относительно небольшого объема вод при значительной площади поверхности его водного зеркала и низкий альбедо за счет чернокоричневого цвета дна. На ст.2, наоборот, был отмечен локальный минимум солености (до 10,98 ЕПС). Эта станция была выполнена в плавнях, в водах, которые были изолированы от самого Сиваша. Вероятно, в эти плавни

поступают более опресненной воды из Азовского моря через тело Арабатской стрелки.

Изменчивость растворенного органического вещества варьировала от 21,7 до 53,9 QSU и имела слабо выраженную тенденцию увеличения в южном направлении (рисунок 4.6).

В целом по акватории съемки явной связи между пространственным распределением концентрации общего взвешенного вещества, которое было относительно однородным, с горизонтальным распределением солености, которая имела тенденцию увеличения в направлении с севера на юг (рисунок 4.6) не прослеживается. Отметим, что низкие значения солености в северной области Сиваша обуславливались тем, что она имеет свободный водообмен через пролив тонкий с Азовским морем. Здесь соленость в период съемки не превышала 9,4 ЕПС. Для южных, наиболее удаленных от этого пролива участков, типична максимальная соленость в 2013 г. достигала 40 ЕПС. Азовские воды, проникающие в Сиваш через пролив Тонкий – один из значимых факторов, определяющих режим солености в заливе. Отсутствие связи между соленостью и Совв может быть обусловлено особенностями пространственного распределения этих параметров на синоптическом масштабе, которые не фиксируются относительно редкой сеткой станций.

Дополнительно, для съемки, выполненной в июне 2013 г. были проведены биологические исследования состава и численности мейобентоса. Совместный анализ распределения общего взвешенного вещества И численности мейобентоса высокой показал наличие достаточно корреляционной зависимости между этими параметрами (коэффициент корреляции 0,89), зависимость может быть описана линейным регрессионным уравнением. Максимальная численность мейобентоса отмечена на тех станциях, где отмечалась максимальное содержание в воде взвешенных частиц.



Рисунок 4.6 – Значения солености (S, EПС), концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) и концентрации окрашенного растворенного органического вещества (С<sub>оров</sub>, QSU) в заливе Сиваш, полученные во время выполнения съемки 14–18.06.2013 г.
**4.2.2.2** Съемка 30.06–01.07.2014 г. В июне 2014 г. концентрация общего взвешенного вещества варьировала в пределах 7,9–13,2 мг/л (рисунок 4.7). Максимальная концентрация ОВВ (13,2 мг/л) (рисунок 4.7) отмечена на самой северной станции (ст.1). Здесь отмечена и максимальная соленость (25,9 ЕПС (рисунок 4.7)). На остальных станциях соленость изменялась в более узких пределах 16,6–18 ЕПС (рисунок 4.7).

Во время проведения летней экспедиции в 2014 г. преобладали ветра западного направления, достигавшего скорости 6 м/с. Можно предположить, что именно с ветровым режимом связано увеличение взвешенного вещества на ст.1. Эта станция, из-за локальной орографии района, наиболее подвержена влиянию ветра западного направления, действие которого приводит к интенсивному взмучиванию мелководного бассейна.

Следует отметить, что экспедиция была проведена практически сразу после перекрытия Северо-Крымского канала, а станции 2–4 находились в области слива дренажных вод с орошаемых полей, в которых еще оставалась пресная вода. Таким образом, уменьшение соленость в этом районе было связано с поступлением с полей пресной воды. Отметим также, что ближе к району сброса дренажных вод (ст.4) наблюдалось некоторое увеличение содержания взвешенных частиц.

Концентрация растворенного органического вещества на исследованной акватории изменялась в узком диапазоне: 1,4–4,7 QSU (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Значения солености (S, EПС), концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) и концентрации окрашенного растворенного органического вещества (С<sub>оров</sub>, QSU) в заливе Сиваш, полученные во время выполнения съемки 30.06–01.07.2014 г. **4.2.2.3** Съемка **16–18.10.2014** г. Осенью 2014 г. концентрация общего взвешенного вещества на исследованных станциях изменялось в пределах 3,6–9,8 мг/л с тенденцией увеличения в северном направлении (рисунок 4.8). В пространственном распределении солености на этих же станциях наблюдалась обратная тенденция, по сравнению с распределением С<sub>овв</sub>. Соленость увеличивалась в южном направлении от 22 до 42 ЕПС (рисунок 4.8). Следует отметить, что соленость в октябре в тех же точках, что и летом, существенно увеличилась, и имела обратную, относительно летнего периода, тенденцию пространственного распределения. Из этого следует, что уже осенью 2014 г. после засушливого лета, а также вследствие отсутствия в Северо-Крымском канале воды и соответственно прекращения орошения полей наблюдалась тенденция резкого роста солености в заливе Сиваш. При этом в областях, где до перекрытия Северо-Крымского канала происходил активный сброс дренажных вод (ст.3, 4) и наблюдалась повышенная мутность, сразу после перекрытия канала содержание взвешенного вещества уменьшилось.

**4.2.2.4 Съемка 16–18.10.2015 г.** В октябре 2015 г. концентрация общего взвешенного вещества в районе выполнения работ варьировала от 3,5 до 19,4 мг/л (рисунок 4.9) и, в среднем была на 4 мг/л выше, чем в октябре 2014 г. Помимо увеличения в целом концентрации общего взвешенного вещества отмечалось и увеличение солености. Возможно, увеличение солености, сопровождающееся увеличением плотности воды, приводит к более медленным седиментационным процессам. Средняя соленость в районе работ составляла 40 ЕПС, диапазон – 28,0–49,6 ЕПС (рисунок 4.9). В горизонтальном распределении солености наблюдалось, как и в октябре 2014 г., ее увеличение в южном направлении. Также увеличилось и содержание растворенного органического вещества до 26,8 QSU (рисунок 4.9).

147



Рисунок 4.8 – Значения солености (S, EПС), концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) в заливе Сиваш, полученные во время выполнения съемки 16–18.10.2014 г.



Рисунок 4.9 – Значения солености (S, EПС), концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) и концентрации окрашенного растворенного органического вещества (С<sub>оров</sub>, QSU) в заливе Сиваш, полученные во время выполнения съемки 16–18.10.2015 г. **4.2.2.5** Съемка 14–15.05.2018 г. Весной 2018 г. значения концентраций общего взвешенного вещества на исследуемой акватории составляли от 2,3 до 25 мг/л (рисунок 4.10). В пространственном распределении С<sub>овв</sub> наблюдались некоторые особенности. Так, высокие С<sub>овв</sub> (12–24 мг/л) были зафиксированы на станциях, расположенных вдоль Арабатской стрелки (ст.3–8) и в районе Южного Сиваша (ст.9, 10). Наиболее прозрачная вода, с минимальной С<sub>овв</sub>, наблюдалась вдоль западного берега Сиваша (ст.11–15) [131].

Соленость колебалась от 24,6 до 74,6 ЕПС (рисунок 4.10). Самая высокая соленость, как и концентрация общего взвешенного вещества, наблюдалась в самой южной части Сиваша (ст.8).

В распределении растворенного органического вещества прослеживалась слабая изменчивость, ее диапазон составлял 30,2–55,6 QSU (рисунок 4.10). Несмотря на это, наблюдалась, аналогичная с распределением С<sub>овв</sub>, тенденция к уменьшению С<sub>оров</sub> у западного берега Сиваша.

Отметим, что данная съемка выполнялась при безветренной, штилевой погоде, что, по-видимому, повлияло на уровень связей между соленостью и  $C_{obb}$  и  $C_{opob}$ . В целом по исследованной акватории Сиваша, с увеличением солености наблюдалось и увеличение  $C_{obb}$  и  $C_{opob}$ . Это соотношение аппроксимировалось экспоненциальными уравнениями (рисунок 4.11, а). Наблюдалась значимая положительная корреляция между концентрациями ОВВ и ОРОВ (R = 0,9), зависимость между этими переменными аппроксимировалась уравнением:  $C_{opob}$  = 2,4× $C_{obb}$ +0,17. Доля OBB/OPOB значительно увеличивалась по экспоненте с увеличением солености (R = 0,9) (рисунок 4.11, б).



Рисунок 4.10 – Значения солености (S, EПС), концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) и концентрации окрашенного растворенного органического вещества (С<sub>оров</sub>, QSU) в заливе Сиваш, полученные во время выполнения съемки 14–15.05.2018 г.



Рисунок 4.11 – Зависимость: а - С<sub>овв</sub>, С<sub>оров</sub> с соленостью; б - соотношения С<sub>овв</sub>/С<sub>оров</sub> с соленостью в заливе Сиваш (14–15.05.2018 г.)

**4.2.2.6** Съемка 7–9.11.2018 г. В осенний период 2018 г. диапазон изменчивости концентрации общего взвешенного вещества заметно возрос. Он изменялся от 1,8 до 70 мг/л (рисунок 4.12). На станциях, расположенных вдоль Арабатской (ст.2-8) стрелки пространственное распределение общего взвешенного вещества было наиболее однородным. В отличие от весеннего периода здесь отмечались минимальные концентрации общего взвешенного вещества с тенденцией слабого увеличения по направлению с севера на юг. Максимальные концентрации общего взвешенного вещества были выявлены в Южном Сиваше с максимумом 70 мг/л (ст.9). Результаты предшествующих съемок показывают, что район западного берега Сиваша характеризовался нестабильностью в содержании общего взвешенного вещества, которая проявлялась в чередовании высоких и низких значений, что связано с ветром и характером изрезанности береговой линии [131].

В дни проведения исследований преобладал слабый ветер (до 3 м/с) направления. Следует северо-восточного отметить, ЧТО ветер такого направления воздействовал на акваторию Сиваша с 30.10.2018 г. по 9.11.2018 г. и достигал максимальной скорости 7 м/с. Таким образом, отмечается влияние продолжительного северо-восточного ветра на пространственное распределение Совв, следствием которого стал перенос взвешенных И

растворенных в воде веществ от подветренного берега (Арабатская стрелка) к наветренному берегу (западный берег Южного Сиваша). С<sub>овв</sub> составляла в среднем 5,7 мг/л у подветренного берега и 22,2 мг/л у наветренного. Еще одним фактором увеличения содержания взвешенных в воде частиц у наветренного берега является рост эрозии клифов. При усилении нормальной к берегу составляющей силы ветра (в данном случае восточного на станциях 9, 10) происходит более интенсивное размытие береговой черты, что сопровождается ростом взвешенного в воде вещества.

По результатам данной съемки особенности пространственного распределения концентраций окрашенного растворенного органического вещества и общего взвешенного вещества были качественно схожи, диапазон изменчивости С<sub>оров</sub> составлял 59–696 QSU (рисунок 4.12).

Между  $C_{obb}$  и  $C_{opob}$  была значимая положительная корреляция (R = 0,99), взаимозависимость аппроксимирована уравнением:  $C_{opob} = 0,034 \times C_{obb} + 0,99$ .

Вместе с тем, явных общих закономерностей в распределениях ОВВ и солености не наблюдалось. Относительно предыдущих съемок, средняя соленость продолжала увеличиваться. Особенно это было заметно в Южном Сиваше. Диапазон изменчивости солености находился в пределах 32–93 ЕПС (рисунок 4.12). На всех станциях, расположенных в Южном Сиваше, в ноябре соленость изменялась в пределах 91–93 ЕПС. На станциях в северной части съемки, ближе всего расположенных к проливу Тонкий, соленость была в два раза меньше, чем в Южном Сиваше. Соленость на самой северной станции не превышала 32 ЕПС [131].

Относительно высокие значения С<sub>овв</sub> и солености были отмечены на двух юго-западных станциях (ст.9, 10) Южного Сиваша. Возможно интенсивное испарение, обуславливающее высокие значения солености, происходило на фоне активной эрозии берегов в этом районе.



Рисунок 4.12 – Значения солености (S, EПС), концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) и концентрации окрашенного растворенного органического вещества (С<sub>оров</sub>, QSU) в заливе Сиваш, полученные во время выполнения съемки 7–9.11.2018 г.

**4.2.2.7** Съемка **4–5.06.2019** г. В июне 2019 г. концентрация общего взвешенного вещества варьировала в диапазоне: 2,5–28 мг/л (рисунок 4.13). Высокое содержание общего взвешенного вещества было отмечено вдоль Арабатской стрелки.

Аналогичная ситуация наблюдалась и в пространственном распределении ОРОВ, концентрация которого также была больше у Арабатской стрелки. Диапазон изменчивости концентрации ОРОВ был в пределах 35–245 QSU (рисунок 4.13).

В июне 2019 г. увеличение содержания общего взвешенного и окрашенного растворенного органического вещества вдоль Арабатской стрелки могло быть связано с более интенсивным, чем у западного побережья Южного Сиваша, цветением фитопланктонных сообществ.

Как и осенью 2018 г., в июне 2019 г. явной связи между пространственными распределениями ОВВ, ОРОВ и солености выявлено не было. В целом, средняя соленость на акватории съемки была высокой и варьировала от 35 до 100 ЕПС (рисунок 4.13).

**4.2.2.8** Съемка 15–20.06.2020 г. В июне 2020 г. концентрация общего взвешенного вещества варьировала в широком диапазоне: 2–34 мг/л (рисунок 4.14). Явной пространственной закономерности в распределении С<sub>овв</sub> на исследованной акватории залива Сиваш в этот период не прослеживалось.

Средняя Сиваша соленость продолжала расти, диапазон a ee 41 пространственной изменчивости был в пределах 128 EПC ОТ ДО (рисунок 4.14).



Рисунок 4.13 – Значения солености (S, EПС), концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) и концентрации окрашенного растворенного органического вещества (С<sub>оров</sub>, QSU) в заливе Сиваш, полученные во время выполнения съемки 4–5.06.2019 г.



Рисунок 4.14 – Значения солености (S, EПС), концентрации общего взвешенного вещества (С<sub>овв</sub>, мг/л) и концентрации окрашенного растворенного органического вещества (С<sub>оров</sub>, QSU) в заливе Сиваш, полученные во время выполнения съемки 15–20.06.2020 г.

4.2.3 Обобщение Комплексный полученных результатов. анализ данных, полученных в период с 2013 по 2020 гг., позволил выявить существенные изменения экосистемы залива Сиваш на начальной стадии и после перекрытия Северо-Крымского канала. Несмотря на достаточно короткий промежуток времени, прошедший после перекрытия Северо-Крымского канала, в заливе Сиваш наблюдаются существенные изменения как солености, Совв и так И биоразнообразия. Также, ПО визуальным и спутниковым C<sub>opob</sub>, наблюдениям, существенно начала сокращаться площадь Сиваша [140].

На межгодовом масштабе наблюдается увеличение средней концентрации OBB с 3,5 мг/л в 2013 г. [53] до 18 мг/л в 2020 г. (R = 0,86) (рисунок 4.15, б) (таблица 4.1). На рисунке 4.16 представлены графики временного хода  $C_{obb}$  в отдельных точках, координаты которых примерно сохранялись от съемки к съемке. Видно, что, не смотря на интенсивную пространственно-временную изменчивость  $C_{obb}$  и S, на большинстве кривых отмечается тенденция к росту  $C_{obb}$ .



Рисунок 4.15 – Осредненная по Сивашу межгодовая изменчивость: а – солености, в – С<sub>овв</sub>, б – корреляция между С<sub>овв</sub> и соленостью

В Сиваше увеличение концентрации ОВВ можно объяснить, как минимум, двумя основными факторами.

Первый фактор связан с увеличением солености. Больше растворенных солей привело к более высокой плотности жидкости и более низкой скорости осаждения частиц того же размера. Подтверждением этого служит четкий тренд увеличения средней солености в заливе Сиваш после перекрытия в

2014 г. Северо-Крымского канала от значений средней солености 29,3 ЕПС в 2013 г. до средней солености 86 ЕПС в 2020 г. ( $\mathbf{R} = 0,98$ ) (рисунок 4.15, а) (таблица 4.1). В горизонтальном распределении солености, начиная с осени 2014 г., наблюдается устойчивая закономерность ее увеличения в южном направлении. Можно с уверенностью предположить, что рост солености в заливе продолжится и в последующие годы. Межгодовые изменения солености и С<sub>овв</sub> значимо коррелируют друг с другом ( $\mathbf{R}^2 = 0,84$ ) (рисунок 4.15, в), как и в случае пространственной изменчивости этих параметров в 2018 г. Тенденция увеличения концентрации ОВВ с увеличением солености отмечается и в других мелководных водоемах Крыма [141] и различных регионах [142–147].



Рисунок 4.16 – Временная изменчивость Совв на отдельных станциях

Вторым фактором является исчезновение тростниковых зарослей или их сокращение, что усилило эрозию берегов [53], и, в свою очередь, привело к увеличению потока минеральных частиц в залив. Наблюдения 2015 г. показали уменьшение ширины тростниковых зарослей *Phragmites australis* вдоль береговой линии [53], погибших в результате повышения солености. В 2018 г. сокращение тростниковых зарослей было гораздо более выраженным. Это способствовало усилению эрозии небольших глиняных обрывов на западном берегу залива; в ветреную погоду у этих обрывов наблюдались пятна повышенной мутности воды.

Год	S, EПC	С <sub>овв</sub> , мг/л	С <sub>оров</sub> , мг/л
2013	29,3	3,5	33,6
2014	25,3	10,3	3
2015	40	10,5	18,3
2016	-	-	-
2017	-	-	-
2018	67	13,9	94,6
2019	73,1	14,6	120
2020	86	18	-

Таблица 4.1 – Осредненные по годам величины солености, С<sub>овв</sub> и С<sub>оров</sub> для залива Сиваш.

Межгодовые тенденции изменения концентрации ОРОВ несколько отличаются от межгодовых изменений концентраций ОВВ. Концентрация ОРОВ растет намного медленнее и не показывает такого последовательного увеличения, как С<sub>овв</sub>. Средняя концентрация ОРОВ составила 33,6 QSU в 2013 г.; к 2019 году она увеличилась более чем в 2 раза и составила 120 QSU (рисунок 4.17) (таблица 4.1). Отметим, что в 2014 г. она была ниже, чем в 2013 г., и составила 3 QSU [53]. Увеличение С<sub>оров</sub>, вероятно, можно объяснить некоторым увеличением биомассы фитопланктонных сообществ [148].



Рисунок 4.17 – Межгодовая изменчивость Соров в заливе Сиваш

Наблюдаемые межгодовые изменения концентрации ОВВ и солености отражаются в межгодовых тенденциях бентосного сообщества Сиваша.

В результате повышения солености В бентосном сообществе уменьшилось количество таксонов в макробентосе мягкого дна. В 2013 году, до закрытия канала, количество таксонов макробентоса составляло одиннадцать, восемь в 2015 году [53] и только пять в 2018 году. Эти изменения отрицательно коррелировали с изменениями солености и Совв В 2013-2018 годах. (рисунок 4.18). Известно, что повышение солености выше 35–50 ЕПС приводит к уменьшению количества таксонов животных [149-156].



Рисунок 4.18 – Взаимосвязь изменений количества макротаксонов в бентосе (кубики) и макробентосе (ромбы): а – с соленостью; б – с С<sub>овв</sub> в заливе Сиваш в 2013–2018 гг.

## Выводы к разделу 4

В результате комплексных гидрологических, гидрооптических измерений и дистанционных исследований, проведенных в Голубой бухте и заливе Сиваш, получены новые данные об этих акваториях и выявлены основные факторы, влияющие на формирование гидрооптической структуры вод [51, 118, 119].

В районе Голубой бухты выявлен мощный источник поступления загрязняющих веществ в акваторию, связанный с выходом сточных вод из разрыва подводного трубопровода основного коллектора очистных сооружений г. Севастополя. Эти загрязненные воды проявлялись в прибрежной полосе, на расстоянии 1000 м от берега в виде вытянутого плюма. Благодаря высокому содержанию в составе плюма растворенных органических и взвешенных веществ, возможна его идентификация оптическими методами. Вертикальная структура вод в области плюма имела слоистую структуру с наличием c ослабления нескольких слоев высокими величинами показателя направленного света и пониженными величинами температуры и солености. Наиболее выраженный слой, как по величинам измеряемых параметров, так и по площади плюма находился в пикноклине. Регулярно наблюдался выход плюма на поверхность, значения гидрооптических параметров здесь были ниже, чем в основном слое. Это связано со слабой диффузией веществ через плотностные градиенты.

На межгодовую изменчивость общего взвешенного вещества в акватории залива Сиваш существенным образом повлияло изменение соленостного режима. Увеличение солености привело к заметному увеличению концентрации общего взвешенного вещества. Увеличение концентрации общего взвешенного вещества в заливе можно объяснить, как минимум, двумя основными факторами. Увеличение растворенных солей привело к более высокой плотности жидкости и более низкой скорости осаждения частиц того же размера. Исчезновение тростниковых зарослей или их сокращение усилило эрозию берегов, что привело к увеличению потока минеральных частиц в залив. Также возможно, что рост концентрации общего взвешенного вещества частично связан с увеличением количества фитопланктона [48, 52, 53, 124, 125, 127-130].

На синоптическом масштабе пространственное распределение общего взвешенного вещества подвержено существенному влиянию ветровых условий. У наветренного берега всегда наблюдается увеличение концентрации общего взвешенного вещества, что связано с ветровым нагоном к этому берегу взвешенных частиц с других районов залива, а также поступлением взвеси за счет эрозии берега [52, 53].

162

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена комплексному изучению процесса формирования и эволюции полей общего взвешенного вещества в разнотипных акваториях Азово-Черноморского бассейна. Основные научные выводы работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. На основе регулярных экспедиционных измерений с использованием разработанной при участии автора аппаратуры создана новая база гидрооптических данных, содержащая более 1000 станций.

2. Выявлено, что вертикальное распределение коэффициентов линейной связи между горизонтальными полями С<sub>овв</sub> и термохалинными параметрами характеризуется наличием двухслойной структуры с устойчивым минимумом связей ниже ВКС, где наблюдаются высокие вертикальные градиенты термохалинных параметров.

3. Показано, что в глубоководной части Черного моря в верхнем слое на распределения поля общего взвешенного вещества основное влияние оказывают термохалинные факторы, на которые в свою очередь оказывают влияния процессы взаимодействия океана и атмосферы (сезонный прогрев и охлаждение, осадки), а также горизонтальная адвекция водных масс. В нижнем обусловливается квазисинхронным смещением по слое значимая связь вертикали повышенными значениями концентрации общего слоев С взвешенного вещества и температуры и пониженными значениями солености.

4. Выявлена зависимость толщины слоя с максимальным содержанием взвеси от величины градиента температуры. Показано, что в областях, где наблюдался максимальный вертикальный градиент температуры, толщина слоя с максимальным скоплением общего взвешенного вещества может уменьшаться почти на порядок по сравнению с районами, где градиент температуры был слабо выражен.

5. Показано, что в вертикальном распределении концентрации общего взвешенного вещества во все сезоны прослеживается основной максимум (пик),

который располагается в верхнем 20-метровом слое. Максимальное содержание общего взвешенного вещества в пике, так же, как и на поверхности, наблюдается летом, в период интенсивного прогрева поверхностного слоя моря, а минимальное – осенью, когда происходит интенсивное выхолаживание вод. Показано, что практически во все сезоны к югу от Керченского полуострова наблюдаются максимальные концентрации общего взвешенного вещества, связанные с поступлением вод Азовоморского происхождения.

6. Выявлены заметные межгодовые колебания гидрооптических параметров. Летом 2017 г. наблюдались аномально высокие значения концентрации общего взвешенного вещества и коэффициента яркости моря в ВКС, что связано с интенсивным цветением микроводорослей кокколитофорид. Аналогичные случаи наблюдались и ранее (2002 г., 2006 г., 2012 г.).

7. Показано, что проявление синоптической изменчивости В распределении общего взвешенного вещества наиболее четко выражено в летней период, когда при ослаблении ОЧТ активно образуются синоптические меандры и вихри. В этот период в областях Севастопольского, Крымского и Феодосийского антициклонических вихрей наблюдалось уменьшение содержания общего Увеличение взвешенного вещества. содержания взвешенного вещества наблюдалось в юго-восточной части съемки В окрестностях восточного циклонического круговорота.

8. Показано, что на гидрооптическую структуру вод в районе акватории Голубой бухты, расположенной в г. Севастополь, оказывало влияние поступление сточных вод из разрыва подводного трубопровода очистных сооружений. Загрязненные воды наблюдались в прибрежной полосе на расстоянии ~ 600 м от берега в виде плюма, вытянутого вдольбереговым течением с юго-востока на северо-запад. Значения показателя ослабления направленного света в плюме превышали фоновые в 3–4 раза. Выявлена суточная периодичность образования этого плюма, которая обусловлена техническим сбросом сточных вод.

164

Показано, что в Сиваше после перекрытия Северо-Крымского 9. канала за последние 6 лет наблюдается увеличение концентрации общего взвешенного вещества в 4-5 раз. Основные механизмы увеличения концентрации общего взвешенного вещества связаны с более медленным осаждением взвешенного вещества в связи с повышением солености и абразионных процессов, плотности, a также с усилением вызванных исчезновением зарослей тростника вследствие увеличения солености. Показано, что пространственное распределение взвешенного вещества в мелководном заливе Сиваш существенно зависит от силы и направления ветра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Volpe V., Silvestri S., Marani M. Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters // Remote Sensing of Environment. – 2011. – Vol. 115. – P. 44–54.
- Xiaolong Yu, Zhongping Lee, Fang Shen, Menghua Wang, Jianwei Wei, Lide Jiang, Zhehai Shang. An empirical algorithm to seamlessly retrieve the concentration of suspended particulate matter from water color across ocean to turbid river mouths // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 235. Art. № 111491. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111491
- Chen M.S., Wartel S., Eck B.V., Maldegem D.V. Suspended matter in the Scheldt estuary // Hydrobiologia. – 2005. – Vol. 540. – P. 79–104. https://doi.org/10.1007/s10750-004-7122-y
- Eisma D. Suspended matter in the aquatic environment // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993. – 315 p.
- Field C.B., Behrenfeld M.J., Randerson J.T., Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components // Science. – 1998. – Vol. 281. – P. 237–240.
- Chassot E., Bonhommeau S., Dulvy N., Melin F., Watson R., Gascuel D., Le Pape O. Global marine primary production constrains fisheries catches // Ecology Letters. – 2010. – Vol. 13. – P. 495–505.
- Murtugudde I., Beauchamp R.J., McClain C.R., Lewis M.R., Busalacchi A. Effects of penetrative radiation on the upper tropical ocean circulation // Journal of Climate. – 2002. – Vol. 15. – P. 470–486.
- Sabine C.L., Feely R.A., Gruber N., Key R.M., Lee K., Bullister J.L., Wanninkhof R., Wong C.S., Wallace D., Tilbrook B., Millero F.J., Peng T., Kozyr A., Ono T., Raios A.F. The oceanic sink for anthropogenic CO2. – Science. – 2004. – Vol. 305. – P. 367–371.
- Roemmich D., McGowan J. Climatic warming and the decline of zooplankton in the California current // Science. – 1995. – Vol. 267. – P. 1324–1326.

- Boyce D., Lewis M., Worm B. Global phytoplankton decline over the past century // Nature. – 2010. – Vol. 466. – P. 591–596. https://doi.org/10.1038/nature09268
- Латушкин А.А., Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Федирко А.В. Связь пространственной структуры концентрации общего взвешенного вещества и гидрологических параметров в северной части Черного моря по данным контактных измерений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 124–137. doi: 10.48612/fpg/4heukxbn-gg7t.
- РД 52.24.468 2005. Взвешенные вещества и общее содержание примесей в водах. Методика выполнения измерений массовой концентрации гравиметрическим методом.
- Konovalov B.V., Kravchishina M.D., Belyaev N.A., Novigatsky A.N. Determination of Concentration of Mineral Suspension and Weighed Organic Substance Based on Their Spectral Absorption // Oceanologia – 2014. – Vol. 54. – P. 704-711. https://doi.org/10.7868/S0030157414040066
- Кременчуцкий Д.А., Кубряков А.А., Завьялов П.О., Коновалов, Б.В., 14. Станичный, C.B., Алескерова, A.A. Определение концентрации взвешенного вещества в Черном море по данным спутника MODIS // Экологическая безопасность прибрежной шельфовой И 30H И комплексное использование ресурсов шельфа. – 2014. – Вып. 29. – С. 5–9.
- Суетин В.С., Суслин В.В., Королёв С.Н., Кучерявый А.А. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Чёрном море летом 1998 г. по данным спутникового прибора SeaWiFS // Морской гидрофизический журнал. – 2002. – № 6. – С. 44–54.
- Суетин В.С., Суслин В.В., Кучерявый А.А., Королёв С.Н. Особенности интерпретации данных дистанционных оптических наблюдений Чёрного моря с помощью прибора SeaWiFS // Морской гидрофизический журнал. 2001. № 2. С. 71–80.

- 17. Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П., Георгиева Л.В. Изменчивость биооптических характеристик в Чёрном море // Океанология. 2004. Т. 44, № 1. С. 1–14.
- Gregg W.W., Casey N.W. Global and regional evaluation of the SeaWiFS chlorophyll data set // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 93. P. 463–479.
- Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М. Региональный алгоритм расчёта концентрации хлорофилла а в Чёрном море по спутниковым данным SeaWiFS // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7, № 2. С. 24–42.
- Ломакин П.Д., Спиридонова Е.О., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Антропогенные и природные источники взвешенного вещества в водах Керченского пролива // Морской экологический журнал. – 2008. – Т. 7, № 4. – С. 51–59.
- 21. Schwarz J.N., Schodlok M.P. Impact of drifting icebergs on surface phytoplankton biomass in the Southern Ocean: Ocean color remote sensing and in situ iceberg tracking // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research. 2009. Vol. 56, №. 10. P. 1727–1741.
- Плеханова В.Д., Мамелин Ю.В., Силюнин В.А., Мамелина А.С. Обзор и анализ существующих методов дистанционного зондирования местности // Теория и практика. – М.: Наука, 2020. – С. 84-95.
- 23. Скороход Е.Ю., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А., Суслин В.В. Биооптические характеристики прибрежных вод Черного моря вблизи Севастополя: оценка точности спутниковых продуктов, восстановленных по данным MODIS И VIIRS // Морской гидрофизический журнал. – 2021. – Т. 37, №. 2. – С. 233–246.
- 24. Павлов А.Н. Пассивные и активные оптические методы зондирования биооптических полей верхнего слоя океана // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Хабаровск:

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2004. - 271 с.

- Kratzer S., Ebert K., Sorensen K. Monitoring the bio-optical state of the Baltic Sea ecosystem with remote sensing and autonomous in situ techniques // The Baltic Sea Basin. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. – P. 407–435.
- 26. Чепыженко А.И. Оптические методы и средства экологического мониторинга // Системы контроля окружающей среды. –2001. С. 41–46.
- Книпович Н.М. Гидрологические исследования в Черном море // Труды Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции. – М.: ВНИИ Морского рыбного хозяйства, 1933. – Вып. 10. – 272 с.
- 28. Книпович Н.М. Гидрология морей и солоноватых вод (в применении к промысловому делу) // М.–Л.: Пищепромиздат, 1938. Вып. 7. 513 с.
- 29. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 725 с.
- Маньковский В.И., Соловьев М.В. Гидрооптические характеристики Черного моря в период 1922–1985 гг. (климатические карты) // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых вод и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2003. – Вып. 8. – С. 23– 47.
- Ли М.Е., Латушкин А.А., Мартынов О.В. Долговременная изменчивость прозрачности поверхностных вод черного моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 40–46.
- Ли М.Е., Толкаченко Г.Л., Маньковский В.И. Аппаратура и методика для гидрооптических наблюдений по программе «Black Sea GOOS» // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон. – 2003. – Вып. 7. – С. 83.
- 33. Ли М.Е., Мартынов О.В. Гидрооптическая аппаратура для подспутниковых исследований // Международный научно-технический семинар «Морское и экологическое приборостроение». – Севастополь, 1995. – С. 29–32.

- 34. Ли М.Е. Разработки гидрооптических приборов в МГИ НАН Украины // Системы контроля окружающей среды. – 2012. – Вып. 17. – С. 7–20.
- 35. Щетинин Ю.Т., Чепыженко А.И., Моисеев Ю.Г. Методические особенности использования зонда ОГХ при поиске пресных субмаринных источников в районе мыса Айя // Морское и экологическое приборостроение. Севастополь: Экоси, 1995. – С. 120–122.
- 36. Маньковский В.И., Маньковская Е.В., Соловьев М.В. Гидрооптические характеристики Черного моря // Справочник. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – 90 с.
- 37. Ломакин П.Д., Попов М.А., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Поле мутности и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты на основе гидрооптических методов наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2012. – Вып. 26, Т. 1. – С. 249–256.
- 38. Маньковский В.И. Оптические характеристики прибрежных вод Черноморского побережья Украины // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАНУ, 1999. – С. 149–152.
- 39. Маньковский В.И., Соловьев М.В., Толкаченко Г.А., Прохоренко Ю.А. Оптические характеристики вод Севастопольской бухты // Акватория и берега Севастополя: Экосистемные процессы и услуги обществу. – Севастополь: ИНБЮМ НАНУ, 1999. – С. 102–114.
- 40. Агафонов Е.А., Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Особенности распределения прозрачности в прибрежных рекреационных и заповедных зонах юго-восточной части Крыма // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2001. Вып. 2. С. 119–129.
- 41. Маньковский В.И., Толкаченко Г.А., Шибанов Е.Б., Мартынов О.В., Корчемкина Е.Н., Яковлева Д.В., Калинский И.А. Оптические характеристики прибрежных вод и атмосферы в районе Южного берега

Крыма в конце летнего сезона 2008 года // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – №3. – С. 52–74.

- Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Оценка загрязнения прибрежных вод у Карадагского заповедника в мае 2007 г. по данным оптических наблюдений // Карадаг-2009. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – С. 439–445.
- 43. Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Поле суммарной взвеси загрязнения вод Феодосийского И оценка залива по данным // гидрооптических наблюдений Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2012. – Вып. 26, Т. 1. – С. 322–330.
- 44. Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Оценка концентрации полей суммарной взвеси и растворенного органического вещества в бухтах крымского побережья на основе данных оптических измерений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2007. – Вып. 15. – С. 168–176.
- 45. Чепыженко А.И., Попов М.А., Еремин И.Ю. Оценка источников загрязнения вод Балаклавской бухты гидрооптическими методами в осенний период // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2005. – Вып. 12. – С. 202–207.
- 46. Ломакин П.Д., Попов М.А. Оценка степени загрязнения и перспектива экологических исследований вод Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2014. – Вып. 28. – С. 195–213.
- 47. Латушкин А.А., Мартынов О.В. Патент РФ №2605640 на изобретение: Способ определения спектрального показателя ослабления направленного света в морской воде in situ. Опубликован 27.12.2016, бюллетень №36.
- 48. Shadrin N.V., Anufriieva E.V., Kipriyanova L.M., Kolesnikova E.A., Latushkin A.A., Romanov R.E., Sergeeva N.G. The political decision caused

the drastic ecosystem shift of the Sivash Bay (the Sea of Azov) // Quaternary International. – 2018. – Vol. 475. – P. 4–10. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.009

- 49. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Lee R.I., Sysoev A.A., Sysoeva I.V., Fedirko A.V., Martynov O.V. The Northern Part of the Black Sea Waters' Bio-optical and Hydrology Structure Features in the Autumn Period 2016 // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2020. Vol. 13, № 3. P. 78–82. doi: 10.7868/S2073667320030065
- Latushkin A.A., Artemiev V.A., Salyuk P.A., Garmashov A.V. Distribution of bio-optical parameters in the Lomonosov equatorial undercurrent in December 2019 // Proc. SPIE 11560, 26rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1156041 (12 November 2020). doi: 10.1117/12.2575466.
- 51. Bondur V.G., Vorobyev V.E., Zamshin V.V., Serebryany A.N., Latushkin A.A., Li M.E., Martynov O.V., Hurchak A.P., Grinchenko D.V. Monitoring Anthropogenic Impact on Some Coastal Water Areas of the Black Sea Using Multispectral Satellite Imagery // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. –2018. Vol. 54, № 9. P. 1008–1022. DOI: 10.1134/S0001433818090098
- 52. Anufriieva E., Kolesnikova E., Revkova T., Latushkin A., Shadrin N. Human-Induced Sharp Salinity Changes in the World's Largest Hypersaline Lagoon Bay Sivash (Crimea) and Their Effects on the Ecosystem // Water. 2022. Vol. 14. Art. 403. 17 p. https://doi.org/10.3390/w14030403
- 53. Shadrin N., Kolesnikova E., Revkova T., Latushkin A., Chepyzhenko A., Dyakov N., Anufriieva E. Macrostructure of benthos along a salinity gradient: The case of Sivash Bay (the Sea of Azov), the largest hypersaline lagoon worldwide // Journal of Sea Research. – 2019. – Vol. 154. – Art. 101811. – 9 p. https://doi.org/10.1016/j.seares.2019.101811
- 54. Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А., Хорошун С.А. Многолетняя изменчивость прозрачности вод в шельфовых и глубоководных районах Черного моря в XX столетии // Экологическая безопасность прибрежных

и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2013. – Вып. 27. – С. 243–248.

- 55. Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин Е.И., Мишонов А.В., Соловьев М.В., Аннинский Б.Е., Георгиева Л.В., Юнев О.А. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х начале 90-х годов // Препринт. Севастополь: Морской гидрофизический институт, 1996. – С. 1–32.
- 56. Прохоренко Ю. А. Распределение и изменчивость показателя ослабления света водой в морях бассейна Атлантического океана // Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. – Севастополь: Морской гидрофизический институт, 1998.
- 57. Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы / под ред. Урденко В.А., Циммермана Г. – Москва-Берлин-Севастополь: ИКИ АН ГДР, 1985. – 272 с.
- 58. Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы / под ред. Урденко В.А., Циммермана Г. – Москва-Берлин-Севастополь: ИКИ АН ГДР, 1987. Т. 2 – 197 с.
- 59. Пененко В.В. Обратные задачи для многокомпонентного мониторинга и усвоения данных наблюдений. // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 4. С. 342–346.
- 4епыженко А.И. Оптические системы для подспутниковой заверки результатов космических исследований морских акваторий // Космическая наука и технология. 2003. № 1. С. 45–53.
- Агафонов Е.А., Шемшура В.Е., Федирко В.И. Комплексные гидрооптические исследования в северо-западной части Черного моря // Севастополь: МГИ АН УССР. Деп. ВИНИТИ, 1982. – № 6016-82. – С. 11.
- 62. Агафонов Е.А., Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Статистические оценки экспериментальных распределений показателя ослабления света в

прибрежных водах Черного моря, прилегающих к берегам Украины // Системы контроля окружающей среды. – 2001. – С. 292.

- 63. Агафонов Е.А., Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А., Чепыженко А.И. Особенности распределения вертикального показателя света В Черного глубоководной части моря. // Труды Международной конференции «Современные проблемы океанологии шельфовых морей России». – Мурманск, 2002. – С. 10–12.
- 64. Агафонов Е.А., Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Распределение и статистические оценки показателя ослабления света в поверхностном слое вод в глубоководной части Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2002. С. 440–446.
- 65. Кукушкин А.С., Агафонов Е.А., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. Изменчивость прозрачности и содержание взвешенного вещества в поверхностном слое северо-западной части Черного моря // Океанология. – 2004. – Т. 44, № 6. – С. 870–881.
- 66. Кукушкин А.С., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. Изменчивость распределения прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое вод северо-западного шельфа и прилегающей к нему открытой части Черного моря в летний период // Океанология. 2006. Т. 46, № 6. С. 834–845.
- 67. Кукушкин А. С., Прохоренко Ю. А. Многолетняя изменчивость показателя ослабления направленного света в верхнем слое глубоководной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон. – 2007. – Вып. 15. – С. 177.
- 68. Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А., Шугаев А.В. Показатель ослабления направленного света в глубоководной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2010. – Вып. 22. – С. 328–335.

- 69. Неуймин Г.Г. Оптические исследования вод Черного моря // Материалы Всесоюзного симпозиума по изучению Черного и Средиземного морей, использованию и охране их ресурсов. К.: Наукова думка, 1973. С. 81–88.
- Полонский А.Б., Гребнева Е.А. Климатическое распределение рН в глубоководной части Черного моря // Системы контроля окружающей среды. – 2017. – Вып. 10. – С. 30.
- 71. Маньковский В.И. Глубинный слой повышенной концентрации взвеси в Черном море и его связь с циркуляцией и структурой водных масс // Экспериментальные исследования МГИ. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1969. – № 16. – С. 83–88.
- 72. Неуймин Г.Г. Стабильный глубоководный слой взвеси в Черном море // Морские гидрофизические исследования. – 1970. – № 1. – С. 178–191.
- 73. Неуймин Г.Г. Распределение взвеси в глубинных областях Черного моря
  // Физика атмосферы и океана. 1965. Т. 1, № 11. С. 1190–1195.
- 74. Маньковский В.И. Оптическая структура вод Черного моря и закономерности ее формирования // Гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря. Севастополь: МГИ АНУ, 1992. С. 7–27.
- 75. Неуймин Г.Г. Оптические исследования вод Черного моря // Материалы всесоюзного симпозиума по изученности Черного и Средиземного морей. К.: Наукова думка, 1973. Ч. 1. С. 81–88.
- 76. Совга Е.Е., Маньковский В.И., Прохоренко Ю.А., Чепурнова Э.А. Природа глубинного мутного слоя в Черном море // Доклады Академии наук Украинской ССР. Серия Б: Геологические, химические и биологические науки, 1987. – № 6. – С. 32.
- 77. Прохоренко Ю.А., Крашенинников Б.Н., Агафонов Е.А., Башарин В.А. Экспериментальные исследования глубинного слоя мутности в Черном море // Морской гидрофизический журнал. – 1993. – № 2. – С. 57–63.
- Волков И.И. Соединения восстановленной серы в воде Черного моря // Изменчивость экосистемы Черного моря. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1991. – С. 53–71.

- 79. Скопинцев Б.А., Тимофеева С.Н., Даниленко А.Ф., Соколова М.В.. Органический углерод, азот, фосфор и их минеральные производные // Океанология. – 1967. – Т. 7, № 3. – С. 457–469.
- Скопинцев Б.А. Формирование современного химического состава вод Черного моря // Л: Гидрометеоиздат, 1975. – 336 с.
- Богоров В.Г., Колесников А.Г., Нелепо Б.А. О связи физической, химической и биологической структуры верхнего слоя Черного моря // Доклады Академии наук СССР. – 1967. – Т. 172, № 5. – С. 1187–1190.
- Кубрякова Е.А., Коротаев Г.К. Моделирование марганцевого цикла в рамках одномерной биогеохимической модели Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2012. – Вып. 26, Т. 2. – С. 272–286.
- 83. Кубрякова Е.А., Коротаев Г.К. Влияние вертикальных движений на поддержание баланса нитратов в Черном море на основе численного моделирования // Океанология. – 2016. – Т. 56, № 1. – С. 30–40.
- 84. Маньковский В.И., Земляная Л.А. Распределение по акватории и сезонная изменчивость глубинного мутного слоя в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2003. № 3. С. 51–53.
- 85. Маньковский В.И. Особенности вертикального распределения показателя ослабления излучения в коротковолновом и длинноволновом участках спектра в глубинных слоях сероводородной зоны и в придонном слое Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2003. № 3. С. 63–67.
- 86. Агафонов Е.А., Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Особенности формирования прозрачности поверхностных вод на шельфе северных районов Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2002. – № 2. – С. 65–67.
- Богуславский С.Г., Березовский А.А., Беляков Ю.М., Ковешников Л.А.
  Вопросы гидрологии Черного моря // Комплексные океанографические исследования Черного моря. К.: Наукова думка, 1980. С. 136–163.

- 88. Богуславский С.Г., Жоров В.А., Паненко М.В. Гидрологогидрохимические процессы поверхностного слоя вод Черного моря // Материалы конференции «Совершенствование управления развитием рекреационных систем». – Севастополь: МГИ АН УССР. Деп. ВИНИТИ, 1985. – Ч. 2. – № 7791-В85. – С. 385–402.
- 89. Большаков В.С. Трансформация речных вод в Черном море // АН Украинской ССР, Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского, Одесское отделение. – К.: Наукова думка, 1970. – 328 с.
- 90. Кукушкин А.С., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. Особенности распределения прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое северо-западной части Черного моря в осенний период // Океанология. 2008. Т. 48, № 3. С. 333–344.
- 91. Кукушкин А.С., Пархоменко А.В. Пространственно-временная изменчивость содержания взвешенного органического фосфора в верхнем слое западной глубоководной и северо-западной шельфовой частях Чёрного моря // Морской экологический журнал. 2013. Т. 6, № 4. С. 62.
- 92. Крупаткина Д.К., Берсенева Г.П. Первичная продукция и хлорофилл «а» Черного моря в осенне-зимний период // Океанология. 1994. Т. 34, № 6. С. 849–854.
- 93. Кукушкин А.С., Белокопытов В.Н. Сезонная изменчивость распределения прозрачности в различных динамических образованиях в глубоководных районах Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2009. – № 18. – С. 319–332.
- 94. Ли М.Е. Погружаемый автоколлимационный прозрачномер // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. 7-й пленум РГ «Оптика океана». – Таллин: ИТЭФ АН ЭССР, 1980. – С. 291–295.

- 95. Латушкин А.А., Ли М.Е., , Мартынов О.В. Некоторые аспекты применения сверхярких светодиодов в гидрооптической аппаратуре // Журнал светотехника. 2013. № 2. С. 45–46.
- 96. Кудинов О.Б., Латушкин А.А. Универсальный автономный накопитель для повышения оперативности гидрооптических исследований in-situ // Процессы в геосредах. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 74–75.
- 97. Латушкин А.А. Спектрофотометрические инструментальные методы оценки пигментно-компонентного состава в природной водной среде. Требования к точностным характеристикам. // Системы контроля окружающей среды. – 2012. – С. 43–47.
- 98. Маньковский В.И., Соловьев М.В. Связь показателя ослабления излучения с концентрацией взвеси в водах Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2003. – № 2. – С. 60–65.
- 99. Ronald J., Zaneveld V., Spinrad R.W., Bartz R. Optical Properties Of Turbidity Standards // Proc. SPIE 0208. Ocean Optics VI, 1980. https://doi.org/10.1117/12.958272
- 100. Klyuvitkin A.A., Garmashov A.V., Latushkin A.A., Orekhova N.A., Kochenkova A.I., Malafeev G.V. Comprehensive Studies of the Black Sea during the Cruise 101 of the R/V Professor Vodyanitskiy // Oceanology. 2019. Vol. 59, № 2. P. 287–289. https://doi.org/10.1134/S0001437019020097
- 101. Латушкин А.А., Ли М.Е., Мартынов О.В. Определение содержания взвешенного вещества оптическими методами в Севастопольской бухте // Материалы конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». – СПб., 2015. – С. 110–112.
- 102. Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана // М.: Флинта Наука, 2009. – 520 с.
- 103. Иванов В.А., Совга Е.Е., Катунина Е.В. Оценки антропогенных воздействий на экосистему акватории Гераклейского полуострова в

районе расположения глубинных стоков // Процессы в геосредах. – 2018. – Т. 1, № 5. – С. 62–68.

- 104. Bondur V.G. Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // In book Waste Water – Evaluation and Management. – Croatia, 2011. – P. 155–180.
- 105. Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И. Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 6. – С. 42–49.
- 106. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3–17.
- 107. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. – 2001. – № 6. – С. 49–67.
- 108. Котляков В.М. Чёрное море // Словарь современных географических названий. Русское географическое общество. Институт географии РАН. – Екатеринбург: У-Фактория, 2006.
- 109. Коршенко А.Н., Матвейчук И.Г., Плотникова Т.И., Удовенко А.В. Черное море // Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям, 2007 год.
- 110. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Fedirko A.V., Martynov O.V., Alekseev D.V. Peculiarities of the suspended matter distribution received by the optical measurements in the photic layer of the north part of the Black Sea in the summer period of 2016 // Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1046634 (30 November 2017). doi: 10.1117/12.2286444. http://dx.doi.org/10.1117/12.2286444

- 111. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Fedirko A.V., Korchemkina E.N., Skripalyova E.A., Khurchak A.P. Hydro-optical structure of the Black Sea active water layer in the spring-summer period of 2017 // Proc. SPIE 10833, 24rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 108333V (13 December 2018). doi: 10.1117/12.2503874
- 112. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Fedirko A.V., Skripaleva E.A., Kudinov O.B. Spatial structure of the total suspended matter concentrations in the northern Black Sea in autumn 2018 according to contact observations // Proc. SPIE 11208, 25rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112084U (18 December 2019). doi: 10.1117/12.2540798
- 113. Латушкин А.А., Ли М.Е., Суслин В.В., Кудинов О.Б. Результаты исследований гидрооптической структуры деятельного слоя Черного моря // Труды конференции «Итоги экспедиционных исследований в 2018 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген». Москва, 2019. С. 100–101.
- 114. А.А. Латушкин, А.А. Сысоев, Р.И. Ли, И.В. Сысоева. Распределение биооптических параметров в фотическом слое северной части Черного моря в период интенсивного цветения кокколитофорид // Труды Х Юбилейной Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». – СПб, 2019. – С. 125–130.
- 115. Латушкин А.А., Артамонов Ю.В., Ли Р.И., Сысоев А.А., Сысоева И.В., Федирко А.В., Мартынов О.В. Особенности биооптической и гидрологической структуры вод северной части Чёрного моря в осенний период 2016 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2021. – Т. 13, № 3. С. 78–82. doi: 10.7868/S2073667320030065.
- 116. Латушкин А.А., Артамонов Ю.В., Федирко А.В. Скрипалева Е.А., Кудинов О.Б. Особенности гидрооптической структуры вод в северной части Черного моря по данным натурных измерений в 2018 г. // Труды Х Юбилейной Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». – СПб., 2019. – С. 120–124.
- 117. Латушкин А.А., Федирко А.В., Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Кудинов О.Б. Гидрооптическая структура вод северной части Черного моря осенью 2018 г. по данным натурных измерений в ходе 103-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования». – Севастополь, 2019. – С. 222–224.
- 118. Latushkin A.A., Lee M. E., Martynov O.V., Khurchak A.P. Investigations of the seawater beam attenuation distribution nearby wastewater discharge on the Herakleian Peninsula shelf // Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1003545 (November 29, 2016). doi:10.1117/12.2249153
- 119. Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Замшин В.В., Серебряный А.И., Латушкин А.А., Ли М.Е., Мартынов О.В., Хурчак А.П., Гринченко Д.В. Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям // Исследование Земли из космоса. 2017. № 6. С. 3–22.
- 120. Bondur V.G., Ivanov V.A., Dulov V.A., Goryachkin Yu.N., Zamshin V.V., Kondratiev S.I., Lee M.E., Mukhanov V.S., Sovga E.E., Chukharev A.M. Structure and origin of the underwater plume near Sevastopol // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. – 2018. – Vol. 11, № 4. – P. 42– 54. doi: 10.7868/S2073667318040068
- 121. Воробьёв В.П. Гидробиологический очерк Восточного Сиваша и возможности его рыбохозяйственного использования // Труды АзЧерНИРО. – 1940. – Вып. 12. – С. 69–164.
- 122. Болтачев А. Р., Карпова Е. П., Саксаганский В. В. Трансформация ихтиоцена Восточного Сиваша (Азовское море) под влиянием антропогенных факторов // Тези доповіді IV міжнародної іхтіологічної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми теоретичної та практичної іхтіології ОНУ ім. І.І.Мечнікова 7-11 вересня 2011 р. – Одеса: Фенікс, 2011. – С. 40–43.

- 123. Drapun I., Anufriieva E., Shadrin N., Zagorodnyaya Y. Ostracods in the plankton of the Sivash Bay (the Sea of Azov) during its transformation from brackish to hypersaline state // Ecologica Montenegrina. – 2017. – Vol. 14. – P. 102–108.
- 124. Kolesnikova E.A., Anufriieva E.V., Latushkin A.A., Shadrin N.V. Mesochra rostrata Gurney, 1927 (Copepoda, Harpacticoida) in Sivash Bay (Sea of Azov): Is It a New Alien Species or a Relict of Tethys? // Russian Journal of Biological Invasions. 2017. Vol. 8, № 3. P. 244–250. https://doi.org/10.1134/S2075111717030079
- 125. Shadrin N., Kolesnikova E., Revkova T., Latushkin A., Chepyzhenko A., Drapun I., Dyakov N., Anufriieva E. Do separated taxa react differently to a long-term salinity increase? The meiobenthos changes in Bay Sivash, largest hypersaline lagoon worldwide // Knowledge and Management Aquatic 420. Ecosystems. \_ 2019. \_ Vol. \_ Art. 36. \_ 14 p. https://doi.org/10.1051/kmae/2019028
- 126. Sergeeva N.G., Shadrin N.V., Anufriieva E.V. Long-term changes (1979–2015) in the nematode fauna in Sivash Bay (Sea of Azov), Russia, worldwide the largest hypersaline lagoon, during salinity transformations // Nematology. 2019. Vol. 21, №. 4. P. 337–347.
- 127. Сергеева Н.Г., Колесникова Е.А., Латушкин А.А., Чепыженко А.А. Разнообразие мейобентоса рыхлых грунтов озера Сиваш // Материалы конференции «Биоразнообразие и устойчивое развитие». – Симферополь, 2014, – С. 323–325.
- 128. Латушкин А.А., Чепыженко А.А., Ломакин П.Д., Мартынов О.В. Гидрооптические исследования восточной части озера Сиваш в летний период 2013 – 2014 гг. // Материалы конференции «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России». – Пгт. Кацивели, 2014. – С. 151–153.
- 129. Шадрин Н.В., Сергеева Н.Г., Латушкин А.А., Колесникова Е.А., Киприянова Л.М., Ануфриева Е.В., Чепыженко А.А.. Трансформация

залива Сиваш (Азовское море) в условиях роста солености: изменения мейобентоса и других компонент экосистемы (2013-2015 гг.) // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2016. – Т. 9, № 4. – С. 452–466.

- 130. Sovga E.E., Eremina E.S., Latushkin A.A. Research expeditions performed by Marine hydrophysical institute in the Sivash bay waters in Spring and Autumn, 2018 // Physical Oceanography. – 2020. – Vol. 27, № 2. – P. 161–170.
- 131. Совга Е.Е., Ерёмина Е.С., Латушкин А.А. Экспедиционные исследования, проведенные Морским гидрофизическим институтом в акватории залива Сиваш весной и осенью 2018 года // Морской гидрофизический журнал. – 2020. – Т. 36, № 2. – С. 176–185. doi: 10.22449/0233-7584-2020-2-176-185.
- 132. Ломакин П.Д., Совга Е.Е., Щурова Е.С., Овсяный Е.И. Экспедиционные исследования Морского гидрофизического института в Восточном Сиваше весной и осенью 2014 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2014. – Вып. 28. – С. 138–145.
- 133. Yakushev, E.V., Chasovnikov, V.K., Murray, J.W., Pakhomova, S.V, Podymov, O.I., and Stunzhas, P.A. Vertical hydro-chemical structure of the Black Sea // The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. –Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – P. 277–307. doi:10.1007/698\_5\_088
- 134. Prants S.V. Dynamical systems theory methods to study mixing and transport in the ocean // Physica Scripta. – 2013. – V. 87 –Art. № 038115.
- 135. Artamonov Yu.V., Latushkin A.A., Skripaleva E.A., Fedirko A.V. Seasonal variability and inter-annual anomalies of hydrooptical characteristics, chlorophyll "a" concentration and temperature on the Black Sea surface in 2017 // Proc. SPIE 10833, 24rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 108333J (13 December 2018). doi: 10.1117/12.2503294

- 136. Корчемкина Е.Н., Ли М.Е. Аномальные оптические характеристики прибрежных вод Черного моря в июле 2012г. и их связь с концентрацией минеральной взвеси в воде // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2015. – Т. 10, № 1. – С. 39–43.
- 137. Чурилова Т. Я., Суслин В. В. О причинах доминирования Emiliania huxleyi в фитопланктоне глубоководной части Черного моря в начале лета // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2012. – Вып. 26, Т. 2. – С. 195–203.
- Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // Sea Technology. – 2004. – P. 53–58.
- 139. Бондур В.Г., Иванов В.А., Дулов В.А., Горячкин Ю.Н., Замшин В.В., Кондратьев С.И., Ли М.Е., Муханов В.С., Совга Е.Е., Чухарев А.М. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 42–54.
- 140. Ерёмина Е.С., Совга Е.Е., Станичный С.В. Динамика площади тростниковых зарослей в заливе Сиваш (Азовское море) по спутниковым данным // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2020. – Вып. 4. – С. 54-65.
- 141. Бульон В.В., Анохина Л.Е., Аракелова Е.С. Первичная продукция гипергалйнных озер Крыма // Труды зоологического института. – 1989. – Т. 205. – С. 14–25.
- 142. López-González P.J., Guerrero F., Castro M.C. Seasonal fluctuations in the plankton community in a hypersaline temporary lake (Honda, southern Spain)
  // International Journal of Salt Lake Research. 1997. Vol. 6. P. 353–371.
- 143. Schallenberg M., Burns C.W. A temperate, tidal lake-wetland complex 2. Water quality and implications for zooplankton community structure // New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research 2003. Vol. 37. P. 429–447.

- 144. Abdo M.H. Physico-chemical characteristics of Abu Za'baal ponds, Egypt //
   Egyptian Journal of Aquatic Research. 2005. Vol. 31. P. 1–15.
- 145. Telesh I.V., Khlebovich V.V. Principal processes within the estuarine salinity gradient: a review // Marine Pollution Bulletin. 2010. Vol. 61. P. 149–155.
- 146. Velasco J., Millán A., Hernández J., Gutiérrez C., Abellán P., Sánchez D., Ruiz M. Response of biotic communities to salinity changes in a Mediterranean hypersaline stream // Saline Systems 2006. Vol. 2. P. 12.
- 147. Elloumi J., Carrias J.F., Ayadi H., Sime-Ngando T., Boukhris M., Bouaïn A. Composition and distribution of planktonic ciliates from ponds of different salinity in the solar saltwork of Sfax, Tunisia. Estuar // Coastal and Shelf Science. – 2006. – Vol. 67. – 21–29.
- 148. Садчиков А. П. Экскреция органического вещества фитопланктоном в природных водоемах // Материалы по флоре и фауне Республики Башкортостан. – 2018. – №. 19. – С. 132-135.
- 149. Дагаева В.А. Наблюдения над жизнью Соленого озера Круглой бухты у Севастополя // Известия Академии наук СССР. VI серия. 1927. Т. 21, № 7. С. 1319–1346.
- 150. Bayly I.A.E. Salinity tolerance and osmotic behaviour of animals in athalassic saline and marine hypersaline waters // Annual Review of Ecology and Systematics. – 1972. – Vol. 3. – 233–267.
- Bayly I.A., Williams W.D. Inland Waters and their Ecology // Camberwell, Victoria: Longman Australia, 1973. – 316 p.
- 152. Por F.D. A classification of hypersaline waters based on trophic criteria // Marine Ecology – 1980. – Vol. 1. – P. 121–131.
- 153. Williams W.D. Salinity as a determinant of the structure of biological communities in salt lakes // Hydrobiologia. 1998. № 381. P. 191–201.
- 154. Pinder A.M., Halse S.A., McRae J.M., Shiel R.J. Occurrence of aquatic invertebrates of the wheatbelt region of Western Australia in relation to salinity // Hydrobiologia. 2005. № 343. P. 1–24.

- 155. Балушкина Е.В., Голубков С.М., Голубков М.С., Литвинчук Л.Ф., Шадрин Н.В. Влияние абиотических и биотических факторов на структурно-функциональную органи-зацию экосистем соленых озер Крыма // Журнал общей биологии. – 2009. – Т. 70, № 6. – С. 504–514.
- 156. Шадрин Н.В., Ануфриева Е.В. Экосистемы гиперсоленых водоемов: структура и трофические связи // Журнал общей биологии. 2018. Т. 79, № 6. С. 418–428.