

**ЛАТУШКИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

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

Специальность 1.6.17 – океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН»

**Научный руководитель:** доктор географических наук, старший научный сотрудник  
**Артамонов Юрий Владимирович**

**Официальные оппоненты:**

**Иванов Владимир Владимирович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», главный научный сотрудник кафедры океанологии географического факультета.

**Куклев Сергей Борисович**, кандидат географических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (Южное отделение), директор.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится 30 марта 2023 г. в 11 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.1.229.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте института:  
[http://mhi-ras.ru/news/thesis\\_defense\\_202210241210.html](http://mhi-ras.ru/news/thesis_defense_202210241210.html)

Автореферат разослан «19» декабря 2022 г.  
Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.01  
кандидат географических наук

Харитоновна Людмила Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования и степень ее изученности.** 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 этих акваторий.

Одним из важнейших показателей экологического состояния вод является взвешенное вещество – неотъемлемый компонент морской среды (Volpe et al., 2011, Xiaolong et al., 2019). Состав и количество взвешенного в 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 (Field et al., 1998, Chassot et al., 2010), а его пространственное распределение зависит от гидрологического режима и динамики вод. 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 [5].

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 (РД 52.24.468, 2005)) являются трудоемкими и требуют значительного времени для получения результата. Применение стандартного гравиметрического метода не позволяет проводить автоматизированный и оперативный мониторинг концентрации взвеси. 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 (Kononov et al., 2014, Кременчуцкий и др., 2014).

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 (Суетин и др., 2001, Чурилова и др., 2004, Gregg et al., 2004). Это обуславливает завышение значений концентраций общего взвешенного вещества (ОВВ) антропогенного происхождения, а также других загрязняющих веществ, относительно истинных концентраций (Ломакин и др., 2008). Во-вторых, дистанционные измерения захватывают лишь поверхностный слой (Schwarz et al., 2009) 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 сложная пространственная структура 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), который тесно связан с количеством 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 уточнения представлений об особенностях пространственно-временной 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 (Чепыженко, 2001, Павлов, 2004, Плеханова и др., 2020, Скороход и др., 2021). Совместный анализ гидродинамических, термохалинных и гидрооптических данных позволит углубить понимание механизмов формирования полей концентрации взвешенного вещества в полузамкнутых, прибрежных и открытых районах Азово-Черноморского бассейна. Большой объем данных, который можно получать при помощи современной зондирующей аппаратуры, с высоким пространственно-временным разрешением о концентрации взвешенного вещества и гидрологических параметрах позволит выделить области с повышенным содержанием взвешенного вещества, отследить их динамику и изучить особенности их вертикальной стратификации.

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 (Книпович, 1933, Маньковский и др., 2003). 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 (Щетинин и др., 1995, Ли, 2012). 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 распределения гидрооптических параметров. Измерения ПОС выполнялись во многих научно-исследовательских рейсах, проводимых Морским гидрофизическим институтом в Черном море (Маньковский и др., 2009).

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 (Маньковский, 1999, Агафонов и др., 2001, Ломакин и др., 2007, 2009, 2012, 2014, Чепыженко и др., 2005, Ломакин и др., 2012), 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 пространственно-временной 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;
2. 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;
3. 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. С использованием разработанной автором гидрооптической аппаратуры получены уникальные массивы данных ПОС с высоким пространственным разрешением для трех акваторий Азово-Черноморского бассейна (северная часть Черного моря, прибрежный участок Гераклеяского полуострова, залив Сиваш), характеризующихся разной степенью влияния природных факторов и уровнем антропогенного воздействия.

2. Впервые получены статистически значимые связи между концентрацией взвешенного вещества и гидрологическими параметрами (температурой, соленостью, плотностью) в глубоководной зоне северной части Черного моря для различных сезонов года.

3. Впервые выявлены закономерности распространения загрязнения из точечного источника в Голубой бухте (Севастополь) на основе совместных гидрооптических и гидрологических измерений.

4. 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.

2. Полученные результаты показывают высокую эффективность использования гидрооптических методов при проведении оперативного мониторинга содержания взвешенного вещества в различных акваториях. Их применение позволяет с вы-

сокой точностью идентифицировать источники поступления загрязняющих веществ, отследить пути их распространения.

3. 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 натуральных 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. 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 [4, 5, 11]. Для оценки биологических компонентов водной экосистемы, связанной с распределением оптических характеристик, проводился отбор проб воды и грунта [9, 13] с последующей обработкой их в лаборатории.

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

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. 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 о том, что минимум коэффициентов корреляции находится ниже ВКС, в слое высоких вертикальных градиентов термохалинных характеристик.

3. Закономерности сезонной изменчивости поля общего взвешенного вещества, заключающиеся в том, что основной максимум концентрации общего взвешенного вещества во все сезоны располагается в пределах верхнего 20-метрового слоя. Наибольшее содержание общего 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 наличии плюмов с высокими значениями гидрооптических параметров, приуроченных 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 пере-

крытия 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 и апробация полученных результатов.** Сопоставление вертикальных профилей ПОС, полученных с помощью разработанных при участии соискателя образцов измерителей, с вертикальными профилями ПОС, полученными с использованием измерителей других производителей (мутномеров 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.

Достоверность научных положений и выводов подтверждаются публикациями в ведущих профильных рецензируемых журналах.

Основные результаты диссертации представлялись на семинарах отдела оптики и биофизики моря и отделения оперативной океанографии ФГБУН ФИЦ МГИ, а также на 33 международных и всероссийских научных конференциях.

**Публикации.** 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 [1–15] работ в рецензируемых научных изданиях и 1 [16] 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.

**Личный вклад автора.** 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 полученных массивов данных им были 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 изменчивости 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.

**Структура работы.** 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.

**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), д-ру 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 «АЭРОКОС-МОС»), 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 Пономареву 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. Кудиннову 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. наук Гармашову А.В. (ФГБУН ФИЦ МГИ), 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 **Разделе 1** рассматривается история проведения гидрооптических исследований в Черном море. Обсуждаются основные известные особенности пространственного распределения гидрооптических параметров в глубоководной части Черного моря и прибрежных районах Крыма. В **подразделе 1.1** выделены четыре основных этапа развития гидрооптических исследований Черного моря. В **подразделе 1.2** описан первый этап развития, когда гидрооптические исследования в Черном море ограничивались измерениями относительной прозрачности воды по глубине видимости белого диска Секки [4]. В **подразделе 1.3** описывается период исследований, в котором был получен основной массив гидрооптических данных, в частности показателя ослабления направленного света (ПОС), при помощи новых методов и инструментальных средств исследований. В этот период изучены некоторые особенности пространственного распределения ПОС в Черном море, а также его межгодовая изменчивость (Агафонов и др., 1982, Прохоренко, 1998, Маньковский и др., 2009, 2010). Показано, что в глубоководной части моря выделяются четыре слоя, которые характеризуются особенностями в распределениях гидрооптических характеристик: поверхностный, промежуточный, пограничный и глубинный. Показано, что наиболее мутные воды в течение года наблюдались 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 продуктивность 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. В **подразделе 1.4** описан период, когда крупномасштабные исследования в Черном море прекратились. Основными объектами исследований в этот период были прибрежные акватории Крыма. Показаны особенности распределения гидрооптических характеристик в Севастопольской, Балаклавской бухтах, а также Голубом заливе и Керченском проливе (Маньковский и др., 1999, 2008, Агафонов и др., 2001, Ломакин и др., 2007, 2009, 2012).

В **Разделе 2** 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.

В **подразделе 2.1** подробно представлены методы и средства исследований. В **пункте 2.1.1** дается полное описание двух измерителей ПОС (СИПО4 и СИПО9), разработанных в соавторстве с диссертантом [16]. Приводятся их конструктивные особенности, программное обеспечение, технические характеристики, специфика учета дестабилизирующих факторов, методы градуировки, результаты испытаний, направленные на оценку стабильности определения ПОС, а также результаты валидации с подобными измерителями других производителей (Рисунок 1).

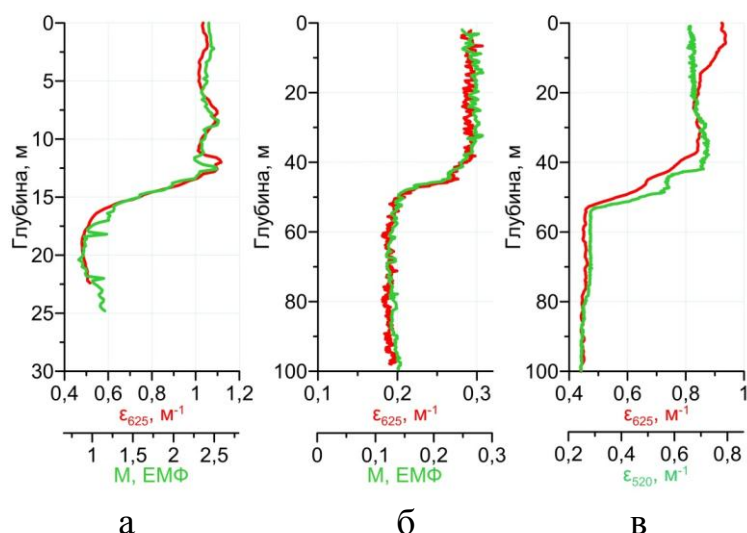


Рисунок 1 – Вертикальные профили, полученные совместно измерителями: СИПО4 ( $\epsilon_{625}, M^{-1}$ ) и мутномером гидрофизического комплекса Кондор ( $M, EM\Phi$ ) (а); СИПО4 ( $\epsilon_{625}, M^{-1}$ ) и мутномером гидрофизического комплекса Idronaut ( $M, EM\Phi$ ) (б); СИПО4 ( $\epsilon_{625}, M^{-1}$ ) и ПУМ-200 ( $\epsilon_{520}, M^{-1}$ ) (в)

В пункте 2.1.1 также приведены регрессионные соотношения для трёх акваторий Азово-Черноморского бассейна (открытый район северной части Черного моря (Рисунок 2, а), прибрежные акватории Севастополя (Рисунок 2, б), и залив Сиваш (Рисунок 2, в)), связывающие ПОС с концентрацией общего взвешенного вещества ( $C_{OBB}$ ), измеренной гравиметрическим методом. При анализе результатов исследований в диссертационной работе соискателя используются значения  $C_{OBB}$ , рассчитанные из ПОС по полученным соотношениям.

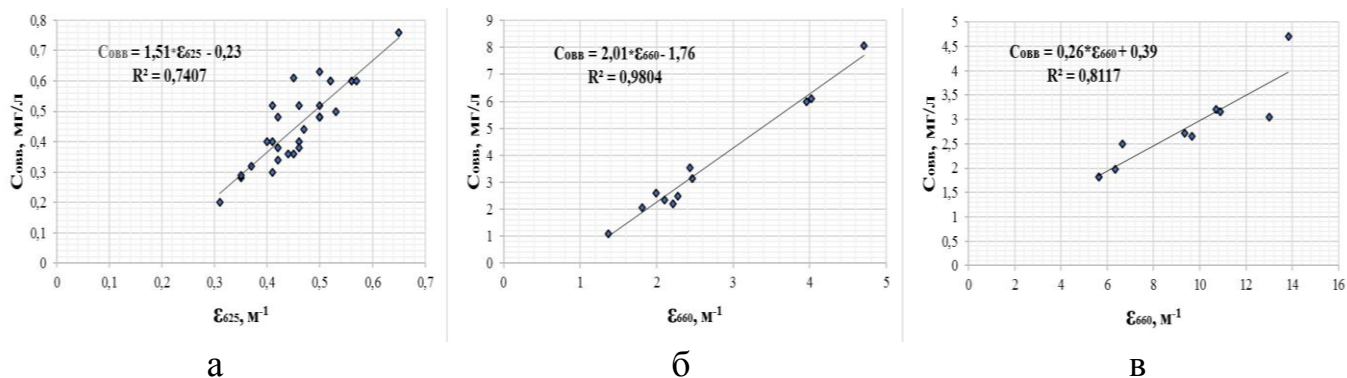


Рисунок 2 – Зависимость  $C_{OBB}$  от ПОС: на 625 нм для открытых районов северной части Черного моря (а); на 660 нм для прибрежных акваторий Севастополя (б); на 660 нм для залива Сиваш (в)

В подразделе 2.2 подробно описываются районы исследований, объем полученных данных и методы проведения измерений.

Исследования, выполненные в Российском секторе северной части Черного моря, охватывали небольшую область северо-западного шельфа, шельфовую зону вдоль Крымского побережья от м. Тарханкут до м. Опук, материковый склон вдоль Крыма и его глубоководную часть. В период 2016–2020 гг. в различные сезоны года были выполнены синхронные измерения гидрооптических и гидрологических ха-

рактических в десяти рейсах НИС «Профессор Водяницкий» [6, 7, 11, 15], в результате которых получен массив данных, содержащий более 1000 вертикальных профилей ПОС.

Прибрежные исследования в районе Севастополя были проведены к юго-западу от Гераклеяского полуострова с учащенной сеткой станций в районе Голубой бухты. Всего за период 2015–2016 гг. в этом районе было выполнено 152 измерения вертикальных профилей ПОС [5].

В полузамкнутом мелководном заливе Азовского моря – Сиваше исследования выполнялись как со стороны материкового Крыма, так и с Арабатской стрелки. В период с 2013 по 2020 гг. было выполнено 80 измерений ПОС в различные сезоны года [2, 3, 8, 9, 10, 12, 13].

Для интерпретации результатов контактных гидрооптических исследований дополнительно использовались гидрологические данные, данные инструментальных измерений течений и гидробиологические данные, спутниковые данные восходящей яркости моря на длине волны 555 нм ( $R_{rs}(555)$ ), а также массивы данных космических оптических многоспектральных изображений (дополнительные данные были получены соавторами совместных публикаций).

**Раздел 3** посвящен анализу пространственно-временной изменчивости общего взвешенного вещества в Российском секторе северной части Черного моря и ее связи с гидрологическими параметрами.

В **подразделе 3.1** приводится подробное описание результатов исследований для отдельных съемок, выполненных 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.

В **подразделе 3.2** дается обобщение полученных особенностей пространственно-временной изменчивости  $C_{ОВВ}$ .

В **пункте 3.2.1** обсуждаются особенности пространственного распределения  $C_{ОВВ}$ . 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. Вместе с тем выделены некоторые общие закономерности, которые можно объяснить влиянием физических механизмов, не зависящих от временной изменчивости гидрологических и оптических параметров.

В пределах съемок выделяются несколько областей с повышенными значениями  $C_{ОВВ}$ , появление которых связано с наличием очагов формирования различных водных масс. К югу от Керченского пролива и Керченского полуострова наблюдалась область повышенных значений  $C_{ОВВ}$ , образование которой связано с выносом более мутных и распресненных азовоморских вод через Керченский пролив. Эти воды, согласно данным инструментальных измерений течений, могут переноситься Основным Черноморским течением (ОЧТ) в западном направлении вдоль берегов Крыма.

Еще одна область высоких значений  $C_{ОВВ}$  наблюдалась в восточной части Черного моря вдоль берегов Кавказа. Она формировалась в результате переноса вдоль береговым потоком ОЧТ на северо-запад мутных и распресненных вод стоков Рио-

ни, 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  $C_{ОВВ}$  иногда прослеживались не только вблизи Кавказского побережья, но и в открытом море.

Помимо вышеперечисленных областей высоких значений концентрации ОВВ, в глубоководной части 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 ОВВ 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 ОВВ, что привело к повышению значений  $C_{ОВВ}$  и солености у поверхности. В целом по данным всех съемок в глубоководной части акватории концентрация ОВВ понижалась по мере удаления от прибрежных источников мутных вод, при этом соленость, как правило, увеличивалась.

В вертикальном распределении коэффициентов линейной корреляции  $R$  между  $C_{ОВВ}$  и термохалинными параметрами на отдельных горизонтах с дискретностью 1 м по вертикали, выявлено наличие устойчивого минимума, который располагается примерно у нижней границы верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) или в термоклине. При этом знак связи выше или ниже этого минимума от съемки к съемке преимущественно сохраняется. Так, в пределах ВКС, в среднем по акватории, между  $C_{ОВВ}$  и температурой, а также между  $C_{ОВВ}$  и соленостью преобладают отрицательные линейные связи, а между  $C_{ОВВ}$  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 фитопланктона. Однако в этом случае соленость в поверхностном слое моря увеличивается. В менее соленых водах увеличение концентрации ОВВ 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  $C_{ОВВ}$  и соленостью отмечаются отрицательные линейные связи.

Ниже основного минимума  $R$  в термоклине отмечаются положительные линейные связи между  $C_{ОВВ}$  и температурой. Это свидетельствует о том, что на этих глубинах в горизонтальных распределениях более теплые пятна совпадают с повышенными значениями  $C_{ОВВ}$ , и подъем и опускание определенных изотерм сопровождается подобным же поведением изоповерхностей концентраций  $C_{ОВВ}$ . Аналогичная, но обратная по знаку связь, наблюдается между  $C_{ОВВ}$  и полями солености и плотности. В нижнем слое значимая связь обуславливается квазисинхронным смещением по вертикали слоев с повышенными значениями концентрации общего взвешенного вещества и температуры и пониженными значениями солености.

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, уста-

новлено, что толщина подповерхностного слоя с высокими значениями концентрации ОВВ, более чем в 1,5 раза превышающими значения  $C_{\text{ОВВ}}$  в выше- и нижележащих слоях, зависит 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 (рисунки 3, 4). Между толщиной слоя с максимальной концентрацией ОВВ и величиной максимального вертикального градиента температуры выявлена значимая линейная корреляция (рисунок 5, а).

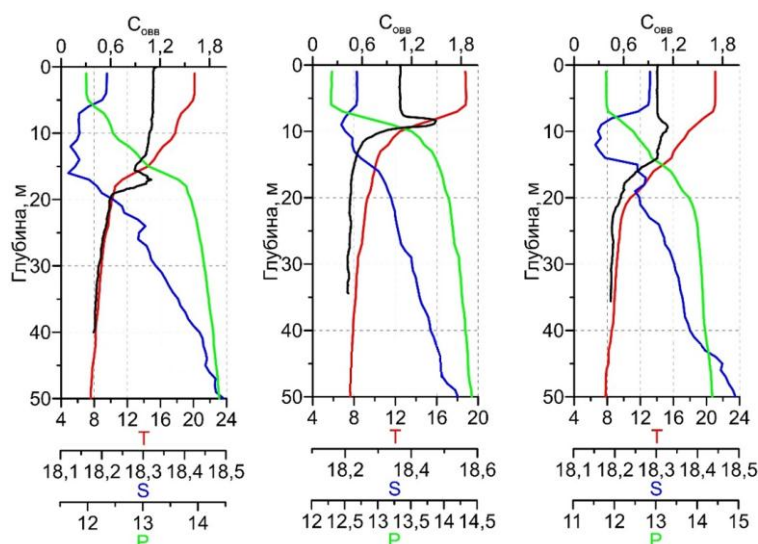


Рисунок 3 – Примеры вертикальных распределений температуры ( $T$ , °C), солёности ( $S$ , ЕПС), плотности ( $P$ ,  $\text{кг/м}^3$ ) и концентрации ОВВ ( $C_{\text{ОВВ}}$ ,  $\text{мг/л}$ ) для различных ситуаций

Глубже подповерхностного максимума концентрации ОВВ наблюдалось ее постепенное уменьшение. В слое примерно 75–120 м по данным всех съемок прослеживался промежуточный минимум  $C_{\text{ОВВ}}$ , 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  $C_{\text{ОВВ}}$  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  $C_{\text{ОВВ}}$  выявлена значимая линейная связь (рисунок 5, б).

Под промежуточным минимумом концентрация ОВВ снова возрастала, при этом на глубинах более 100–170 м на вертикальных профилях прослеживался ряд максимумов  $C_{\text{ОВВ}}$ . При переходе от глубоководной части моря к материковому склону наблюдалась тенденция как увеличения глубины залегания этого максимума, так и самих значений  $C_{\text{ОВВ}}$  (рисунок 6). Анализ вертикальной структуры поля плотности показал, что наибольшее увеличение содержания взвешенных веществ наблюдается в слое залегания изопикнических поверхностей 16,15–16,35  $\text{кг/м}^3$ , который охватывает нижнюю границу субкислородной редокс-зоны и верхний слой сероводородной зоны, верхняя граница которой условно определяется по положению изопикны 16,2  $\text{кг/м}^3$ .

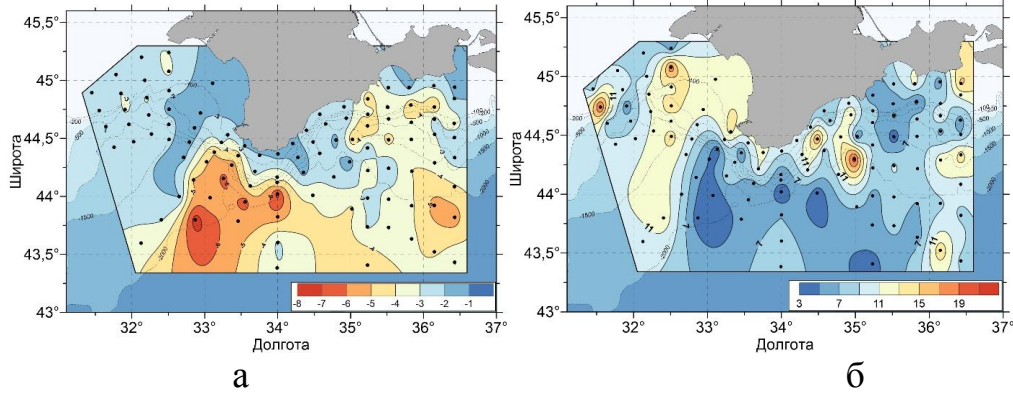


Рисунок 4 – Пример распределения: величины максимального градиента температуры (ВГТмакс, °C/м) (а); толщины слоя с максимальными значениями концентрации ОВВ (толщина слоя  $C_{\text{ОВВ-макс}}$ , м) (б)

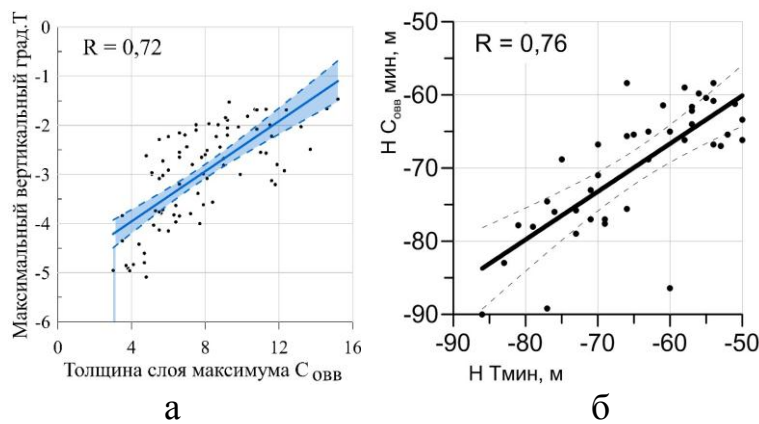


Рисунок 5 – Зависимость: толщины слоя с максимальными концентрациями ОВВ ( $H_{C_{\text{ОВВ-макс}}}$ , м) от максимального вертикального градиента температуры (ВГТмакс, °C/м) (а); между глубинами залегания ядра ХПС и промежуточного минимума  $C_{\text{ОВВ}}$  по данным зимней съемки 2017 г (б). Штриховые линии – границы 95%-го доверительного интервала

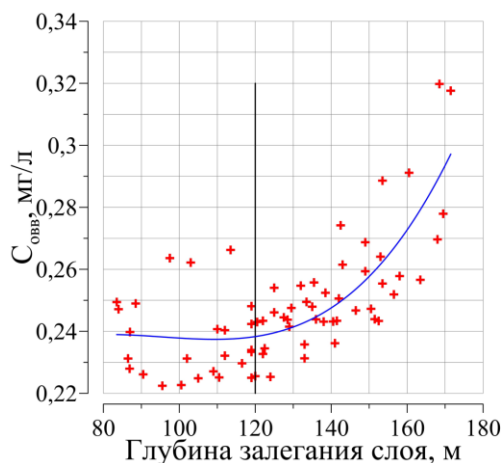


Рисунок 6 – Зависимость концентрации ОВВ ( $C_{\text{ОВВ}}$ , мг/л) от глубины слоя максимальных значений ОВВ в сероводородной зоне моря

В пункте 3.2.2 на основе данных съемок, выполненных в разное время года, показано, что, несмотря на присутствие синоптической и межгодовой изменчивости, в распределениях концентрации ОВВ и гидрологических характеристик наблюдаются

ся различия, которые можно объяснить сезонными изменениями. Эти различия особенно четко проявляются в пределах верхнего квазиоднородного слоя.

В весенний период (апрель – май) на большей части исследованной акватории отмечается невысокое содержание общего взвешенного вещества ( $C_{ОВВ} \sim 0,3–0,5$  мг/л) (таблица 1). Горизонтальное распределение значений  $C_{ОВВ}$  на поверхности характеризуется квазиоднородностью, за исключением района Керченского полуострова. Здесь величины  $C_{ОВВ}$  были максимальны и достигали 1,3 мг/л в мае 2017 г. и 1,2 мг/л в мае 2019 г. Это увеличение  $C_{ОВВ}$  было связано как с поступлением через Керченский пролив более мутных азовоморских вод, так и с процессами взмучивания в мелководных участках акватории в прибрежной зоне. Наиболее прозрачная вода с низким содержанием общего взвешенного вещества ( $C_{ОВВ} \sim 0,3$  мг/л) отмечалась в северо-западной части полигона. Вертикальная стратификация  $C_{ОВВ}$  в конце апреля – начале мая выражена слабо.

Таблица 1 – Осредненные значения  $C_{ОВВ}$  для различных районов северной части Черного моря

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

В летний период наблюдалось более высокое содержание ОВВ, чем в другие сезоны, за исключением акватории юга Керченского полуострова (таблица 1). Увеличение содержания общего взвешенного вещества и его неоднородное распределение летом связано с весенне-летним пиком цветения фитопланктона, наблюдаемым в период наиболее интенсивного прогрева вод.

В вертикальном распределении  $C_{ОВВ}$  летом наблюдается устойчивая стратификация вод, характеризующаяся наличием верхнего оптически однородного слоя, совпадающего по толщине с ВКС в термохалинных полях, и увеличением содержания ОВВ в термоклине. Выявлено, что летом глубина залегания максимумов  $C_{ОВВ}$  совпадает с нижней границей ВКС.

В первой половине осени в распределении  $C_{ОВВ}$  наблюдается ситуация, подобная весеннему периоду. Отмечается низкое содержание ОВВ на большей части акватории и повышенные значения  $C_{ОВВ}$  в районе Керченского полуострова (таблица 1). 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 наблюдалась высокая изменчивость концентрации взвешенного вещества, которая была наиболее выражена в восточной части полигона. Наибольшие значения содержания  $C_{ОВВ}$  отмечались на обширном шельфе южнее Керченского полуострова, где в результате интенсивных зимних штормов происходит взмучивание донных отложений. Следует отметить, что увеличение  $C_{ОВВ}$  в восточной части полигона связано также с зимним цветением фитопланктона в Черном море (зимний пик цветения фитопланктона).

Зимой выявлена наиболее высокая согласованность между распределениями  $C_{ОВВ}$  и гидрологических параметров на отдельных горизонтах с дискретностью 1 м по вертикали. В пределах ВКС между  $C_{ОВВ}$  и температурой наблюдается максимальная отрицательная корреляция ( $R$  до 0,99), между  $C_{ОВВ}$  и соленостью – максимальная положительная ( $R$  до 0,8).

Таблица 2 – Величины коэффициентов линейной корреляции  $R$  между глубинами залегания подповерхностного максимума  $C_{ОВВ}$  и максимумов ВГТ ( $R(НС_{ОВВ\max} - Н ВГТ\max)$ ) и вертикальных градиентов плотности (ВГП) ( $R(НС_{ОВВ\max} - Н ВГП\max)$ ). Значимые на 95%-ном уровне величины  $R$  выделены жирным

Параметр	Весенний период		Летний период			Осенний период			Зимний период	
	2017	2019	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2018	2020
$R(НС_{ОВВ\max} - Н ВГТ\max)$	0,32	<b>0,94</b>	<b>0,91</b>	<b>0,65</b>	<b>0,9</b>	<b>0,82</b>	0,33	<b>0,82</b>	0,1	0,35
$R(НС_{ОВВ\max} - Н ВГП\max)$	0,35	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,65</b>	<b>0,74</b>	<b>0,79</b>	0,35	<b>0,83</b>	0,1	0,25

Установлено, что сезонная изменчивость проявляется и в характеристиках подповерхностного максимума концентрации ОВВ. Так, наибольшая глубина расположения максимума  $C_{ОВВ}$  наблюдалась в осенний период, при этом значения  $C_{ОВВ}$  в максимуме были минимальные. Минимальная глубина расположения максимума  $C_{ОВВ}$  отмечается в весенний и зимний периоды. В летний период глубина залегания максимума  $C_{ОВВ}$  возрастала по сравнению с весенним и зимним сезонами и была близка к осеннему периоду. При этом значения  $C_{ОВВ}$  в максимуме летом были более чем в два раза выше, чем осенью.

В целом в летне-осенний период между глубинами залегания подповерхностного максимума  $C_{ОВВ}$  и максимумов вертикальных градиентов температуры и плотности выявлен высокий уровень корреляции (таблица 2).

**Раздел 4** посвящен анализу пространственно-временной изменчивости гидрооптической структуры вод прибрежных акваторий Крыма и ее связи с гидрологическими и биологическими параметрами.

В подразделе 4.1 приводится анализ результатов проведенных комплексных исследований, выполненных в ходе шести экспедиций в прибрежных акваториях Гераклейского полуострова, который позволил выделить ряд особенностей в распределениях гидрооптических характеристик и определить основные факторы, влияющие на эти распределения. 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 600 м от берега в виде вытянутого плюма. Благодаря высокому содержанию в плюме растворенных органических и взвешенных веществ, возможна его идентификация оптическими методами. На рисунке 7 приведена обобщенная карта зон загрязнений, обнаруженных по космическим оптическим многоспектральным изображениям в районе коллектора сбросового устройства очистных сооружений у г. Севастополь.

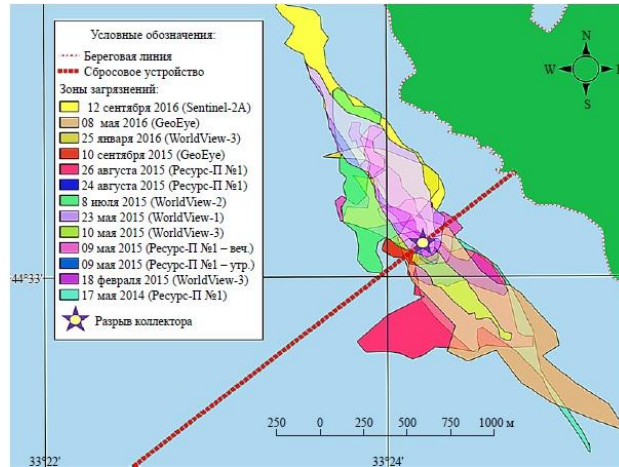


Рисунок 7 – Сводная карта загрязнений, сформированная по результатам обработки космических оптических многоспектральных изображений, полученных в период с 17 мая 2014 г. по 12 сентября 2016 г. в районе расположения коллектора сбросового устройства очистных сооружений у г. Севастополь

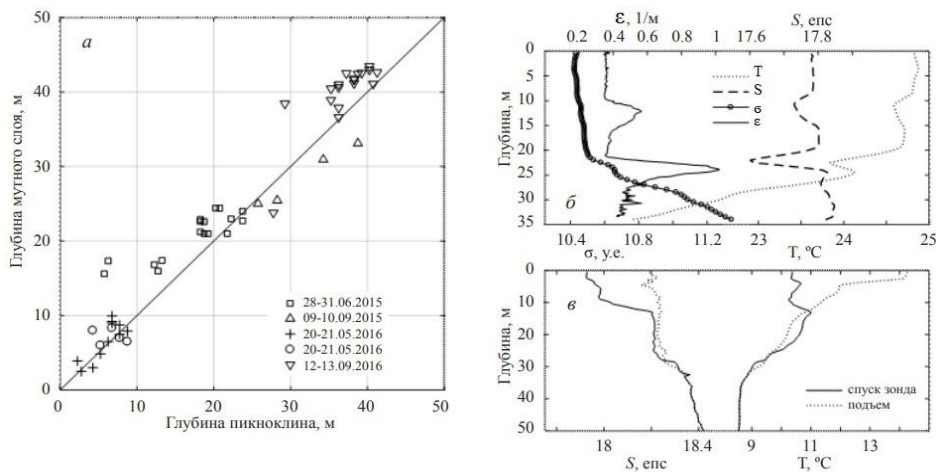


Рисунок 8 – Связь глубины слоя максимально мутных вод с глубиной пикноклина (а); вертикальные распределения показателя ослабления направленного света на 370 нм ( $\epsilon_{370}$ ,  $\text{м}^{-1}$ ), условной плотности ( $P$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ), температуры ( $T$ , °C), солености ( $S$ , ЕПС) (б); вертикальные распределения температуры ( $T$ , °C) и соленость ( $S$ , ЕПС) в пятне выхода мутных вод на поверхность (в)

Вертикальное распределение ПОС и гидрологических характеристик в области плюма имело слоистую структуру с наличием нескольких слоев с высокими величинами показателя ослабления направленного света и пониженными величинами температуры и солености (рисунок 8). Наиболее выраженный слой, как по величинам измеряемых параметров, так и по площади плюма, находился в пикноклине (ри-

сунок 8). По данным исследований получена зависимость глубины залегания слоя максимально мутных вод от глубины пикноклина (рисунок 8, а). 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.

В ходе проведения экспериментов возникали ситуации абсолютно синхронной фиксации поверхностных проявлений глубинных стоков контактными и космическими методами.

В **подразделе 4.2** приводятся результаты исследования пространственно-временной изменчивости содержания взвешенного вещества в заливе Сиваш за период с 2013 по 2020 гг. В **пункт 4.2.1** указаны сроки выполнения съемок. Всего было выполнено 10 комплексных съемок, охватывающих весенне-летний и осенний сезоны.

В **пункте 4.2.2** дается подробное описание результатов каждой из 10 съемок. Показаны пространственные особенности распределения взвешенного вещества в зависимости от метеорологических условий. Установлено, что 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 здесь с ветровым нагоном взвешенных частиц, а также с поступлением взвеси за счет абразии берега.

В **пункте 4.2.3** обобщены все полученные результаты исследований, выполненные в заливе Сиваш. Комплексный анализ данных, полученных в период с 2013 по 2020 гг., позволил выявить существенные изменения экосистемы залива Сиваш после перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 г. Несмотря на достаточно короткий промежуток времени, прошедший после перекрытия Северо-Крымского канала, в заливе Сиваш наблюдаются существенные изменения как солености,  $C_{\text{ОВВ}}$  и концентрации окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ), так и биоразнообразия. По визуальным и спутниковым наблюдениям можно заключить, что существенно начала сокращаться площадь поверхности Сиваша.

На межгодовом масштабе наблюдается увеличение средней концентрации ОВВ с 3,5 мг/л в 2013 г. до 18 мг/л в 2020 г. ( $R = 0,86$ ) (рисунок 9, б) (таблица 3). На рисунке 10 представлены графики временного хода  $C_{\text{ОВВ}}$  в отдельных точках, координаты которых примерно сохранялись от съемки к съемке. Видно, что, не смотря на интенсивную пространственно-временную изменчивость  $C_{\text{ОВВ}}$  и  $S$ , на большинстве кривых отмечается тенденция к росту  $C_{\text{ОВВ}}$ .

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. ( $R = 0,98$ ) (рисунок 9, а) (таблица 3). 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, если ситуация с Северо-Крымским каналом не изменится. Межгодовые изменения со-

лености и  $C_{\text{ОВВ}}$  значимо коррелируют друг с другом ( $R = 0,91$ ) (рисунок 9, 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 и различных регионах (Бульон и др., 1989, Schallenberg et al., 2003, Abdo et al, 2005, Telesh et al, 2010).

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

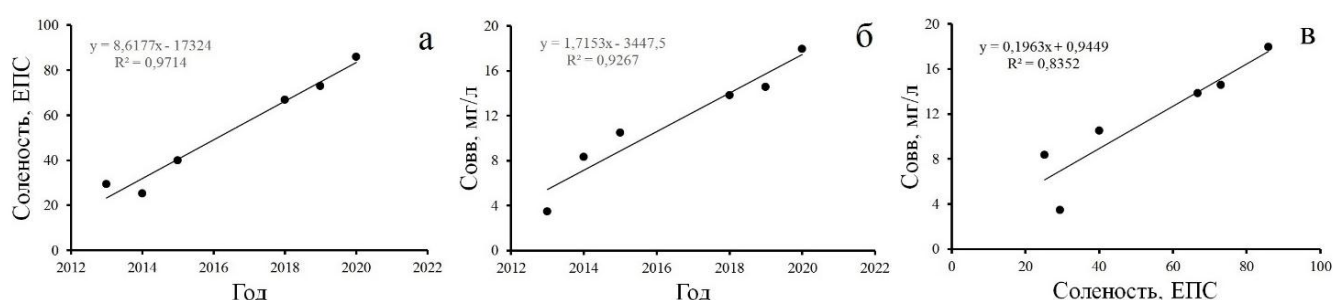


Рисунок 9 – Осредненная по Сивашу межгодовая изменчивость: солености (а);  $C_{\text{ОВВ}}$  (б); корреляция между  $C_{\text{ОВВ}}$  и соленостью (в)

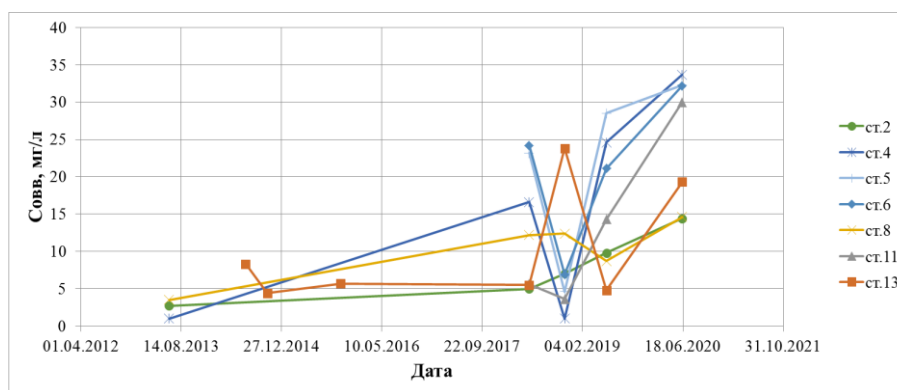


Рисунок 10 – Временная изменчивость  $C_{\text{ОВВ}}$  на отдельных станциях

Таблица 3 – Осредненные по годам величины солености,  $C_{\text{ОВВ}}$  и  $C_{\text{Оров}}$  для залива Сиваш

Год	S, ЕПС	$C_{\text{ОВВ}}$ , МГ/Л	$C_{\text{Оров}}$ , QSU
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	-

Межгодовые тенденции изменения концентрации ОРОВ ( $C_{ороб}$ ) несколько отличаются от межгодовых изменений концентраций ОБВ. Концентрация ОРОВ растет намного медленнее и не показывает такого последовательного увеличения, как  $C_{обв}$ . Средняя концентрация ОРОВ составила 33,6 QSU в 2013 г.; к 2019 году она увеличилась более чем в 2 раза и составила 120 QSU (таблица 3). Отметим, что в 2014 г. она была ниже, чем в 2013 г., и составила 3 QSU. Увеличение  $C_{ороб}$ , вероятно, можно объяснить увеличением биомассы фитопланктонных сообществ.

**В Заключении** сформулированы основные результаты работы.

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  $C_{обв}$  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 слое значимая связь обуславливается квазисинхронным смещением по вертикали слоев с повышенными значениями концентрации общего взвешенного вещества и температуры и пониженными значениями солёности.

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 взвешенного вещества. Увеличение 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.

9. Показано, что в Сиваше после перекрытия Северо-Крымского 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 солёности и плотности, а также с усилением абразионных процессов, вызванных исчезновением зарослей тростника вследствие увеличения солёности. Показано, что пространственное распределение взвешенного вещества в мелководном заливе Сиваш существенно зависит от силы и направления ветра.

## ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

### *Статьи в рецензируемых научных журналах*

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. P. 50–52 (Ли М.Е., **Латушкин А.А.**, Мартынов О.В. Некоторые аспекты применения свёрхярких 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. № 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. Т. 11. № 3. С. 40–46. doi: 10.7868/S207366731803005X).

5. 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 (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).

6. 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 Cruise 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., Anufrieva 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., Anufrieva 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' Bio-optical 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. **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., 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/4heu-kxbn-gg7t).

15. 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.

#### *Патент на изобретение*

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук  
Латушкина Александра Александровича

Подписано к печати 1 декабря 2022 г.  
Объем 0,9 п.л.

Заказ № 777

Формат бумаги 60.84 1/16  
Тираж 100 экз.

Напечатано в типографии «КУПОЛ»  
299053  
г. Севастополь, ул. Муссонная, 46  
Тел.: +7 978 784 66 32  
[kupol.sevastopol@mail.ru](mailto:kupol.sevastopol@mail.ru)