На правах рукописи

Кубряков Арсений Александрович

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДИНАМИКИ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ НА СЕЗОННЫХ И МЕЖГОДОВЫХ МАСШТАБАХ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА МОРСКУЮ ЭКОСИСТЕМУ

Специальность 1.6.17 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Севастополь – 2023

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

Официальные оппоненты:

Ермаков Дмитрий Михайлович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, заведующий отделом «Исследования Земли из космоса».

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.

Кошель Константин Валентинович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории геофизической гидродинамики.

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Защита состоится 25 октября 2023 г. в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.1.229.02 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_202303291210.html.

Автореферат разослан «14» июля 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.02
кандидат физико-математических наук

Алексеев Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Динамические процессы в морской среде вызывают перенос по вертикали и по горизонтали живых организмов и необходимых для их жизнедеятельности питательных элементов, оказывая существенное влияние на функционирование морских экосистем. Динамика океана зависит от атмосферного воздействия, которое является первопричиной возникновения крупномасштабных течений и вертикальной циркуляции в верхнем слое вод, а также во многом определяет интенсивность турбулентного обмена, связанного с действием касательного напряжения трения ветра и конвективного выхолаживания. Неустойчивость течений, возникающая в результате их усиления/ослабления, взаимодействия с топографией дна и других процессов, приводит к образованию меандров и синоптических вихрей на естественных масштабах порядка радиуса Россби. Относительно крупномасштабная изменчивость атмосферных полей передает энергию на меньшие масштабы в океан, приводя к возникновению поверхностных дрейфовых течений, крупномасштабных геострофических течений, меандров, океанических вихрей различных масштабов, апвеллингов/даунвеллингов. Эти динамические процессы определяют горизонтальные и вертикальные потоки питательных веществ, необходимые для развития фитопланктона, и условия освещенности, вызывая его перенос в освещенные или темные слои вод под действием вертикальных движений. Такие физические факторы влияют не только на концентрацию фитопланктона, но и на его таксономический состав, что в конечном итоге определяет развитие высших трофических уровней и биопродуктивность океана в целом.

Горизонтальный обмен особо важен для окраинных и внутренних морей, поскольку перераспределяет питательные элементы между богатыми ими шельфовыми районами и более бедными водами центральной части акваторий. Замкнутость Черного моря и значительный речной сток во многом определяют его уникальную физическую и биохимическую структуру (Скопинцев, 1975; Сорокин, 1982; Иванов, Белокопытов, 2012). Поступление большого количества пресных вод приводит к резкой халинной стратификации, значительно ослабляя вертикальное перемешивание в море и связанный с ними тепло-, соле– и газообмен, что является одной из причин существования безжизненной сероводородной зоны в нижних слоях бассейна. Речной сток является важнейшим источником биогенных элементов, которые попадают с его водами в шельфовые области, а оттуда под действием различных динамических процессов – в глубоководную часть моря.

Высокие градиенты солености способствуют увеличению потенциальной энергии вод Черного моря. Действие циклонической завихренности ветра приводит к наклону пикно-халоклина и переходу потенциальной энергии в кинетическую, что вызывает интенсификацию бароклинной динамики вод (Булгаков и др., 1996; Зацепин и др., 2010). Основным динамическим элементом Черного моря является циклоническое Основное Черноморское течение (ОЧТ), огибающее бассейн над его континентальным склоном, и два циклонических круговорота, расположенных в восточной и западной частях бассейна (Книпович, 1932; Блатов, 1984; Овчинников,

Титов, 1990). Важной особенностью динамики бассейна является обилие бароклинных вихрей, которые влияют на термохалинную структуру бассейна, вертикальное перемешивание и играют значительную роль в горизонтальном обмене соли, тепла и питательных веществ в бассейне (Латун, 1990a; Oguz et al., 1993; Ginzburg et al., 2000, 2002; Korotaev et al., 2003; Zatsepin et al., 2003). Поступление большого количества органических и неорганических веществ вместе с речными водами значительно уменьшает прозрачность в бассейне и толщину его эвфотического слоя (Маньковский и др., 2003). Низкая прозрачность и малые глубины перемешивания приводят к относительно неглубокому залеганию слоя максимума биогенных элементов – нутриклина – в Черном море. Малые толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) приводят, в отличие от умеренных широт открытого океана, к существованию зимних цветений фитопланктона в Черном море. Однако вертикальные смещения пикноклина способны значительно изменять толщину ВКС в зимний период.

Вертикальный обмен, обусловленный вертикальной адвекцией, ветровым и конвективным перемешиванием, является важнейшим внутренним источником биогенных элементов. Значительное влияние на интенсивность перемешивания и вовлечение глубинных вод в верхние слои Черного моря оказывает халинная стратификация, которая также характеризуется межгодовой изменчивостью. Из-за близкого положения нутриклина к поверхности влияние вертикальных движений вод, связанных с интенсивным штормовым воздействием, ветровыми апвеллингами, циклонической циркуляцией, вихревыми движениями различного знака на вертикальный поток биогенных элементов в эвфотический слой в Черном море имеет особо важное значение, что делает крайне актуальным исследование совместного влияния динамических процессов и освещенности на вертикальное распределение фитопланктона.

Несмотря на то, что существует большое количество работ, посвященных исследованию динамики и экосистемы Черного моря, многие свойства их изменчивости и взаимодействия, особенно на длительных межгодовых масштабах, до сих пор недостаточно изучены. Слабо исследованы сезонная и межгодовая изменчивости характеристик вихревой динамики Черного моря; механизмы взаимодействия крупномасштабной и вихревой динамики; влияние горизонтального обмена на межгодовую изменчивость биооптических характеристик бассейна; изменчивость условий освещенности в бассейне и её связь с концентрацией хлорофилла А; влияние интенсивного атмосферного воздействия, вертикальной адвекции и перемешивания в различных динамических структурах на развитие цветений фитопланктона и связанное с ними вертикальное распределение биооптических характеристик вод в Черном море.

Определение взаимосвязи атмосферных, гидрофизических и гидробиологических процессов необходимо для понимания причин изменчивости состояния морских экосистем в условиях меняющегося климата. Описание этих связей позволит в конечном итоге развить качественные физико-биохимические модели, которые дадут возможность контролировать и прогнозировать изменения в морских экосистемах, эффективнее и безопаснее использовать морские ресурсы.

Объектом исследования диссертационной работы является Черное море.

Предметом исследования диссертации являются крупномасштабная динамика и синоптические вихри, горизонтальный и вертикальный обмен, влияние абиотических факторов на биологические характеристики морских экосистем.

Цели и задачи работы. Цель работы – исследование изменчивости динамических процессов в Черном море, их влияния на горизонтальный и вертикальный обмен и особенности функционирования экосистемы бассейна на сезонных и межгодовых масштабах.

Задачи исследования:

- исследовать пространственное распределение, сезонную и межгодовую изменчивость характеристик вихрей Черного моря, их влияние на стратификацию, термохалинную структуру вод, транспорт тепла и соли в бассейне;
- исследовать механизмы изменчивости и взаимодействия крупномасштабной и вихревой динамики Черного моря на сезонных и межгодовых масштабах, их связь с ветровым воздействием;
- исследовать влияние горизонтального обмена, связанного с крупномасштабной, вихревой динамикой и дрейфовыми течениями, на распространение шельфовых вод и изменчивость распределения концентрации хлорофилла А в Черном море на межгодовых масштабах;
- исследовать сезонную и межгодовую изменчивость вертикального распределения основных биооптических характеристик Черного моря: концентрации хлорофилла А, показателя обратного рассеяния, фотосинтетически активной радиации (ФАР), коэффициента ослабления света;
- исследовать влияние физических факторов – освещенности, динамического и атмосферного воздействия на вертикальную эволюцию цветений фитопланктона и особенности функционирования экосистемы Черного моря.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы. Результаты, полученные в работе, позволили существенно расширить фундаментальные представления о механизмах формирования и изменчивости характеристик синоптических вихрей, взаимодействия динамических процессов разных масштабов, влияния крупномасштабной и вихревой динамики на термохалинную структуру вод и обмен примесью в Черном море. Новые данные о взаимосвязи атмосферных, гидрофизических и гидробиологических процессов позволили расширить представление о динамике фитопланктонных сообществ и их изменчивости под влиянием различных физических процессов (штормового воздействия, зимнего выхолаживания, переноса шельфовых вод под влиянием дрейфовых и геострофических течений, изменений условий освещенности). Полученные результаты необходимы для понимания причин современных изменений гидрологической структуры и экосистемы Черного моря в условиях меняющегося климата, развития и валидации численных биохимических моделей, которые дают возможность контролировать и прогнозировать изменения в морских экосистемах, эффективнее и безопаснее использовать морские ресурсы.

В диссертационной работе развиты новые дистанционные методы определения скоростей поверхностных течений, характеристик вихрей, транспорта

примеси и нефтяных загрязнений. Информация об этих процессах востребована широким кругом потребителей, деятельность которых связана с судоходством, рыболовством, добычей и транспортировкой сырья. К внедренным результатам относится модель расчета траектории дрейфа нефтяных загрязнений FOTS, позволяющая прогнозировать последствия нефтяных разливов, определять источники загрязнений и суда-виновники аварий. Данная модель оперативно применяется на морском портале инженерно-технологического центра «Сканекс» и неоднократно была использована для прогноза распространения нефтяных загрязнений и поиска объектов в различных районах Мирового океана (Черном, Каспийском, Карском, Балтийском морях).

Связь с научными программами, планами, темами. Работа выполнялась в соответствии с планами научных исследований и прикладных тем Морского гидрофизического института РАН, а также сотрудничества в рамках научно-исследовательских проектов, государственных контрактов и хозяйственных договоров, в том числе, 9 проектов Российского фонда фундаментальных исследований (под руководством соискателя – 4), 3 проектов Российского научного фонда (под руководством соискателя – 2**).**

Методология и методы исследования. Основным методическим подходом диссертационного исследования являлся комплексный анализ разнородных океанографических и гидрометеорологических данных: спутниковых измерений альтиметров, оптических и ИК-радиометров, скаттерометров; гидрологических данных судовых съемок, дрейфующих буев Арго, заякоренных буев; биооптических данных измерений с буев Био-Арго, данных численного моделирования циркуляции океана и массивов реанализа атмосферных полей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Количество и суммарная кинетическая энергия синоптических антициклонов в Черном море находятся в противофазе с кинетической энергией средних течений на сезонных и межгодовых масштабах. Выраженная межгодовая изменчивость интенсивности течений Черного моря определяется влиянием завихренности ветра, ослабление которой приводит к переходу от “струйного” режима динамики с выраженным ОЧТ к “вихревому”, способствуя усилению горизонтального обмена в бассейне.
2. Вовлечение шельфовых вод является важным источником доступной потенциальной энергии для антициклонов Черного моря. Причиной усиления антициклонической вихревой динамики на сезонных и межгодовых масштабах при ослаблении завихренности ветра являются положительные потоки плавучести, вызванные оттоком опреснённых шельфовых вод в центральную часть моря при релаксации экмановского даунвеллинга.
3. Усиление горизонтального вихревого обмена в периоды ослабления завихренности ветра вызывает значительный рост концентрации хлорофилла А в Черном море на межгодовых масштабах. Этот эффект важен особенно в зонах резких биохимических градиентов – в районе континентального склона и центрального северо-западного шельфа.
4. Наблюдающаяся интенсификация ветрового и динамического воздействия вызывает ослабление халинной стратификации верхнего слоя Черного моря,

способствует усилению вертикального обмена и возникновению аномально сильных цветений фитопланктона в теплый период года.

5. Характеристики вертикального обмена модулируют изменения условий освещённости в Черном море, которые оказывают определяющее влияние на вертикальное распределение концентрации хлорофилла А в толще вод.

Научная новизна. Помимо защищаемых положений, новизной обладают следующие результаты диссертационной работы:

– методы двухмерной автоматической идентификации вихрей по спутниковым измерениям и методы трехмерной автоматической идентификации вихрей по данным численного моделирования, позволившие исследовать горизонтальное и вертикальное распределение их характеристик (радиуса, орбитальной скорости, завихренности, параметров формы, вертикальной термохалинной структуры), время жизни, скорость перемещения, повторяемость наблюдения; сезонную и межгодовую изменчивость вышеперечисленных параметров, особенности влияния синоптических вихрей на стратификацию, транспорт тепла и соли в бассейне;

– описание механизма влияния ослабления крупномасштабной циркуляции и ослабления экмановской дивергенции на сезонную интенсификацию антициклонов Черного моря;

– описание механизма влияния кросс-шельфовых потоков плавучести на интенсификацию синоптических антициклонов в Черном море;

– оценки влияния сезонной и межгодовой изменчивости крупномасштабной динамики на рост уровня моря в прибрежной части Черного моря и водообмен с Азовским морем;

– новый метод расчета поверхностных дрейфовых течений по данным дрифтерных и альтиметрических измерений;

– лагранжева модель и программные продукты расчета траекторий перемещения плавающих частиц, речных плюмов и растекания нефтяных загрязнений, основанная на спутниковых данных и данных атмосферных реанализов;

– механизмы влияния крупномасштабной и вихревой динамики на пространственно-временную изменчивость концентрации хлорофилла А в Черном море на межгодовых масштабах;

– новые оценки межгодовой и пространственной изменчивости толщины ВКС, её связь с крупномасштабной и вихревой динамикой в Черном море;

– механизм влияния ветрового перемешивания на осолонение верхних слоев и ослабление халинной стратификации Черного моря;

– оценки сезонной и межгодовой изменчивости вертикального распределения основных биооптических характеристик Черного моря: концентрации хлорофилла А, показателя обратного рассеяния, фотосинтетически активной радиации (ФАР), коэффициента ослабления света на различных длинах волн в центральной части Черного моря;

– описание вертикального распределения интенсивности цветений кокколитофорид и механизмов их влияния на образование растворенного органического вещества в Черном море на основе оптических измерений;

– механизмы влияния вертикального вовлечения глубинных вод в верхние слои в зимний период и влияния изменчивости халинной структуры Черного моря на возникновение аномально сильных летних цветений кокколитофорид;

– механизм влияния штормового воздействия на развитие цветения фитопланктона в теплый период в Черном море;

– оценки сезонной изменчивости вертикального распределения ФАР и его взаимосвязь с вертикальным распределением концентрации хлорофилла А;

– механизмы влияния интенсивности конвекции и самозатенения на изменчивость концентрации хлорофилла А, положение её подповерхностного максимума и условия освещенности в Черном море.

Степень достоверности. Достоверность результатов диссертации обеспечивается использованием большого объема данных, проведенной в работе валидацией и сопоставлением данных различных источников информации (спутниковых, контактных измерений, данных численного моделирования), применением, наряду с новыми подходами, традиционных методов океанографического и гидрометеорологического анализа.

Апробация результатов. Материалы исследований, представленных в диссертации, докладывались на более, чем 30 всероссийских и международных конференциях.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано в соавторстве 125 научных работ, из них 60 статей в рецензируемых научных журналах и 65 статей в сборниках трудов и материалов конференций.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяет 39 работ в рецензируемых научных изданиях [1–39]. В их числе 39 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу Web of Science [1–39], 35 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу SCOPUS [1–5, 7–13, 15–19, 22–39]. 12 работ [1, 11, 15, 16, 18, 19, 24, 26, 29, 33, 37, 38] опубликованы в изданиях первого квартиля (Q1).

Личный вклад автора. Диссертантом проводилась постановка целей и задач работы, выбор и разработка методов исследования и анализа, разработка программного обеспечения, выполнение расчетов и анализ полученных результатов, формулировка основных научных положений и выводов, которые вошли в диссертацию.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 701 наименований. Общий объем диссертации составляет 470 страниц, включая 209 рисунков и 4 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своим многоуважаемым соавторам Станичному С.В., Зацепину А.Г., Микаэляну А.С., Шокурову М.В., Белокопытову В.Н., Белоненко Т.В., Горячкину Ю.Н., Сизову А.А., Матвееву А.Ю., Островскому А.Г., Волкову Д.Л., Кубряковой Е.А., Мизюку А.И., Гармашову А.В., Алескеровой А.А, Подымову О.И. за совместный плодотворный труд и содержательные научные дискуссии, а также Коротаеву Г.К. за поддержку начинаний автора. Автор также выражает искреннюю признательность членам своей семьи за помощь на разных этапах подготовки – Наумовой Н.В. за переводы

и редакцию текста; Кубрякову А.И. за чуткое руководство; Кубрякову В.А. за помощь при подготовке выступлений на конференциях; Кубряковой Е.А. за помощь на всех этапах работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, методы исследования, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту. Приводится информация о теоретической и практической значимости работы, связь с научными программами, сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

Раздел 1 настоящей работы посвящен исследованию особенностей и физических причин изменчивости крупномасштабной и вихревой динамики вод Черного моря на основе спутниковых измерений и численного моделирования.

В подразделе 1.1 на основе измерений спутниковых альтиметров проводится исследование сезонной и межгодовой изменчивости крупномасштабных полей течений, уровня Черного моря и её связи с ветровыми характеристиками. Показано, что на масштабах от синоптических до межгодовых изменчивость скорости ОЧТ и интегральной кинетической энергии течений Черного моря определяется вариациями завихренности ветра (рис. 1, а, б, г). Ход интенсивности течений сдвинут относительно хода завихренности ветра: максимальных значений 0,84 коэффициенты корреляции достигают для рядов, сглаженных 90–дневной фильтрацией, и 0,72 – для однолетнего сглаживания при временном лаге $\Delta t = 2$ недели и 1 месяц, соответственно (рис.1, а, б). Особенно сильные изменения крупномасштабной динамики бассейна отмечаются во время периодов резкого ослабления завихренности ветра, которые наблюдаются в бассейне с периодом 7–10 лет. В такие годы режим течений значительно меняется, ОЧТ может полностью исчезать, а вся циркуляция представляет собой набор вихрей разного знака (рис. 2).

Наблюдаемый положительный тренд завихренности ветра в 1992–2019 гг. вызывает долговременную интенсификацию ОЧТ в Черном море. Усиление циклонической циркуляции сопровождается ростом динамического уровня в прибрежной части бассейна и его падением в центре моря. Крупномасштабная экмановская накачка является определяющим фактором для изменчивости динамического уровня Черного моря на масштабах более 30 дней, и корреляция между этими величинами в прибрежной части моря превышает 0.8 (рис. 1, в).

Увеличение динамического уровня моря в прибрежной части бассейна приводит к запиранию шельфовых вод, и, в частности, к снижению водообмена между Азовским и Черным морем. Проведенные **в пункте 1.1.3** оценки по данным альтиметрии показали, что в среднем усиление циклонической циркуляции в зимний период приводит к уменьшению перепада уровня *dh* в Керченском проливе на 10 см. Среднегодовой *dh* в годы с интенсивной циркуляцией (2006, 2008, 2010 гг.) уменьшается более, чем в 3 раза от значений 18 см до 6 см, а в отдельные периоды динамический эффект приводит к полному запиранию водообмена в проливе. Таким образом крупномасштабная динамика способна значительно влиять

на поступление опреснённых и эвтотрофных вод в центральную часть Черного моря.

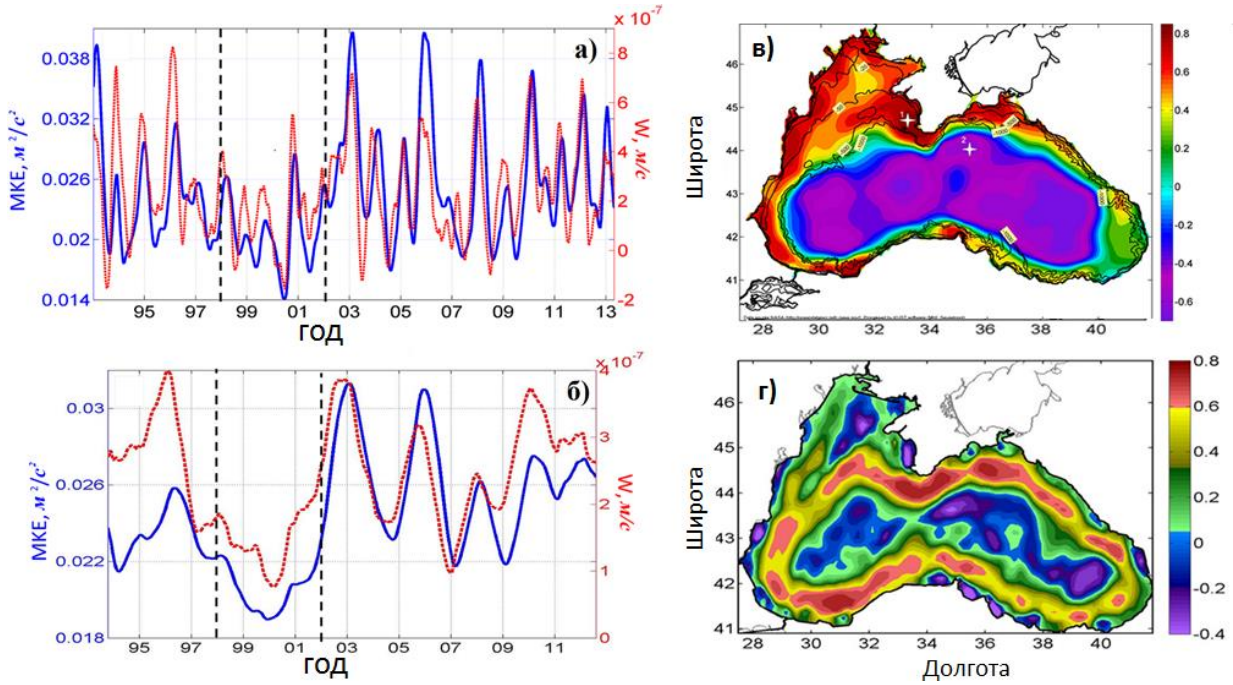

Рисунок 1 – Временная изменчивость осредненной по площади моря кинетической энергии течений *MKE* (синяя линяя) и экмановской накачки W_{ek} (красная линяя), сглаженная скользящим средним с шириной окна фильтрации: (а) – 90 дней, (б) – 1 год. Карты корреляции между осредненной по площади бассейна завихренностью ветра (*W*) и: (в) динамическим уровнем моря *DSL*, м; (г) кинетической энергией течений *MKE* в каждой точке сетки по данным спутниковой альтиметрии, м^2/с^2. Корреляция построена для рядов, сдвинутых относительно *W* на 2 недели

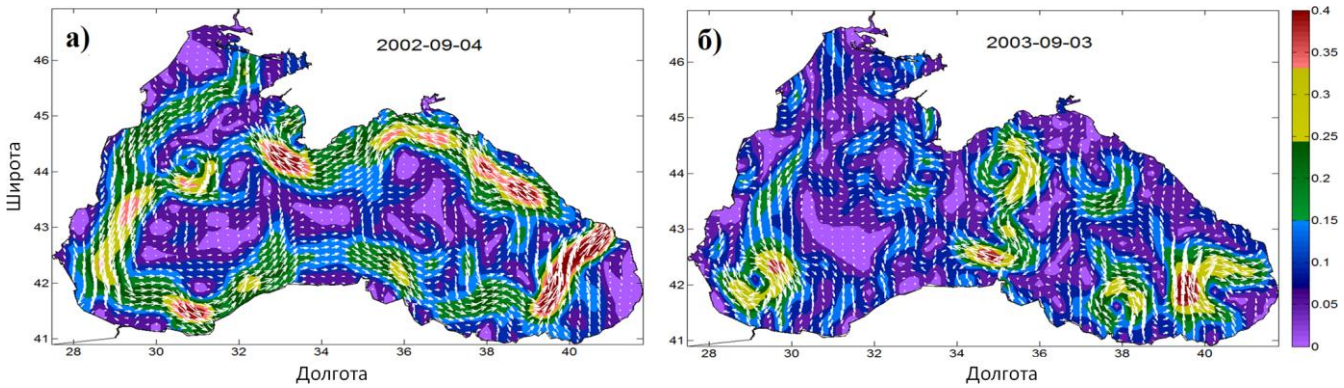

Рисунок 2 – Примеры карт поверхностных геострофических течений, полученных по данным альтиметрии, демонстрирующие межгодовые изменения режима течений Черного моря: за 4 сентября 2002 г. (а), 3 сентября 2003 г. (б)

Подраздел 1.2 посвящен исследованию пространственно-временной изменчивости характеристик синоптических вихрей Черного моря на основе спутниковых измерений. **В пункте 1.2.1** приводится детальное описание разработанного метода идентификации вихрей (рис. 3, а, б), который основан на выделении замкнутых линий тока в поле скорости с помощью лагранжевых

методов, и его валидация на основе сопоставления со спутниковыми оптическими измерениями.

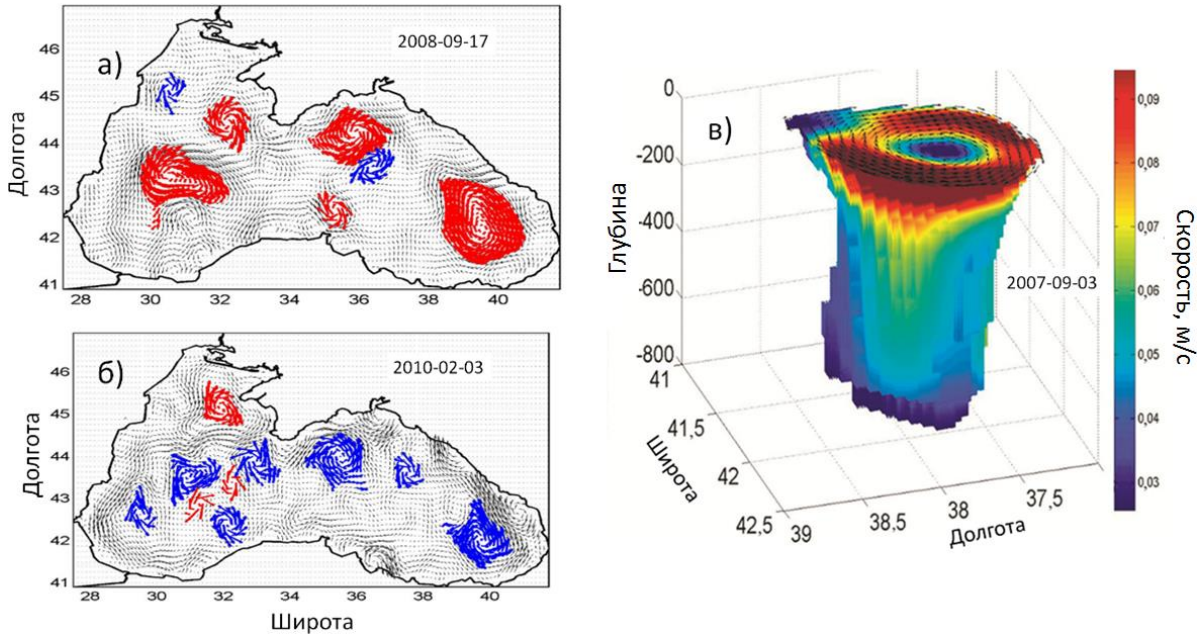

Рисунок 3 – Пример идентифицированных вихрей по данным альтиметров за 17 сентября 2008 г. (а); 3 февраля 2010 г. (б). Пример идентифицированного трехмерного вихря по модели NEMO в поле скорости за 3 сентября 2007 г. (в)

На основе этого метода **в пункте 1.2.2** проводится подробный анализ статистических особенностей характеристик вихрей Черного моря и их пространственной изменчивости. По данным спутниковой альтиметрии за 1992–2011 гг. идентифицировано более 10000 вихревых образований с временем жизни более 4 недель и диаметром более 40 км. Рассчитаны характерные траектории вихрей, впервые получено пространственное распределение их характеристик: радиуса, орбитальной скорости, времени жизни, завихренности, параметров формы, скорости перемещения и частоты наблюдения, исследована их эволюция в период существования. Показано, что в Черном море наблюдается больше циклонических вихревых (ЦВ) образований, чем антициклонических (АВ). Однако антициклоны существуют в среднем дольше, имеют большие радиусы и орбитальную скорость, их вклад в суммарную вихревую кинетическую энергию намного выше (рис. 4).

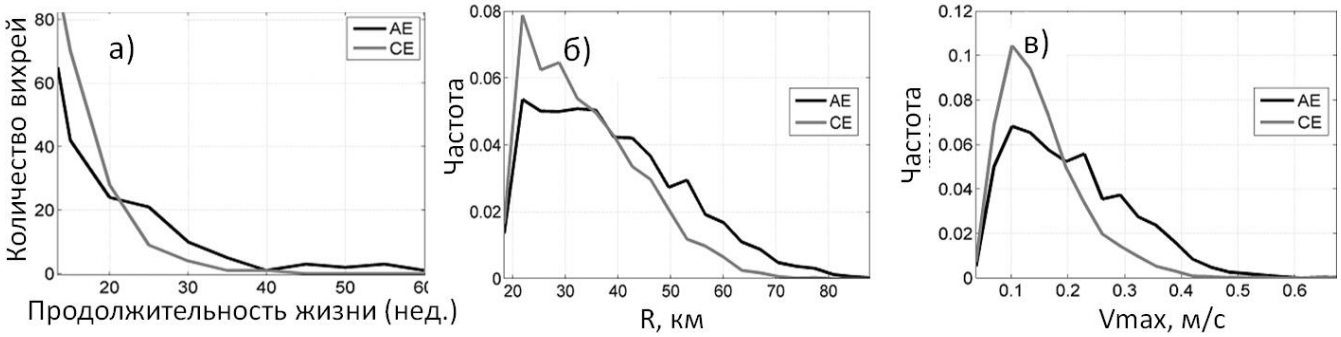

Рисунок 4 – Статистические распределения: (а) продолжительности жизни; (б) радиуса вихря (км); (в) максимальной орбитальной скорости вихря (м/с) по данным спутниковой альтиметрии

Вихри являются наиболее крупными и интенсивными на континентальном склоне в северной, восточной и западной частях бассейна, с максимумами в известных местах стационирования Севастопольского, Батумского и Керченского вихрей, а в южной части их размер и орбитальная скорость значительно меньше (рис. 5).

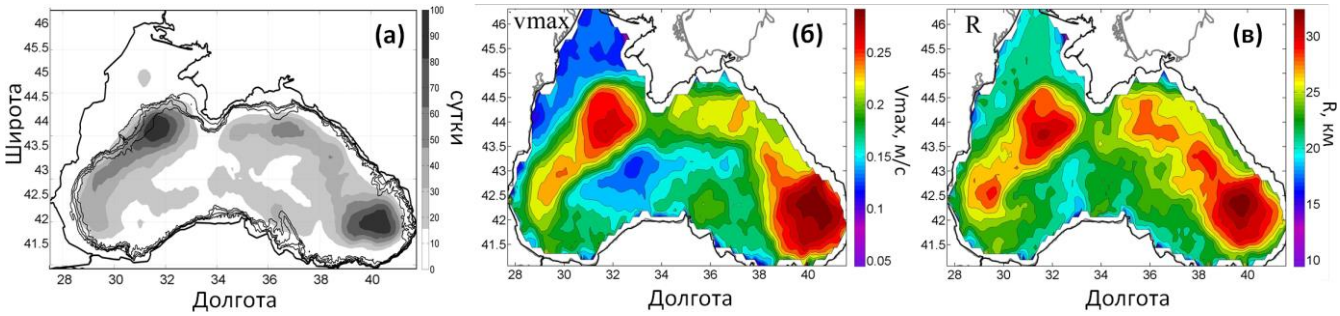

Рисунок 5 – Пространственное распределение: (а) количества дней в году, в которых в данной точке наблюдается антициклоны (сплошными линиями нанесены изобаты); (б) максимальной орбитальной скорости вихрей (*Vmax*, м/с), (в) радиуса вихрей (км) по данным спутниковой альтиметрии

В пункте 1.2.3 исследована временная изменчивость характеристик крупных синоптических антициклонов и циклонов в Черном море. Анализ показал, что сезонная и межгодовая изменчивость количества и кинетической энергии антициклонов находится в противофазе с кинетической энергией (*MKE*) бассейновой циркуляции и завихренностью ветра (рис. 6). Наиболее интенсивная генерация АВ отмечается сразу после начала уменьшения *MKE*, следующего за пиком интенсивности течений в феврале (рис. 6, а). Сезонный ход изменчивости количества образующихся антициклонов в месяц противоположен изменчивости производной по времени от *MKE* ($\frac{\partial MKE}{\partial t}$, где t – время).

Когда течения начинают замедляться ($\frac{\partial MKE}{\partial t}<0$), количество образующихся в Черном море антициклонов растет в среднем от 1 шт./мес. в феврале, до 2,5 шт./мес. в апреле (рис. 6, б). Интенсивное образование АВ наблюдается с марта по июнь пока $\frac{\partial MKE}{\partial t}$ имеет отрицательный знак, т.е. в период ослабления течений. Количество образующихся циклонов имеет более сложную и в целом противоположную к АВ изменчивость. Максимальное количество генерируемых ЦВ в октябре (в среднем около 2,6 шт./мес.), ноябре (в среднем около 2,4 шт./мес.), январе (в среднем около 2,5 шт./мес.) наблюдается в месяцы с максимальным положительным значениям $\frac{\partial MKE}{\partial t}$, т.е. соответствует периоду ускорения ОЧТ и связано с усилением циклонического сдвига течений.

На межгодовых масштабах наблюдаются те же особенности: годы с самой слабой циркуляцией характеризуются максимальным количеством синоптических антициклонов (рис. 6, в). В годы с интенсивной зимней циркуляцией общее количество АВ примерно в 1,4 раза меньше, чем в годы со слабым ОЧТ. В частности, увеличение энергии ОЧТ после 2002 г. привело к заметному сокращению количества антициклонов в бассейне в 2003–2013 гг. по сравнению с периодом

1998–2001 гг. В то же время самые мощные и долгоживущие антициклоны в Черном море образуются в годы с наиболее интенсивным ОЧТ в марте–апреле сразу после начала его ослабления.

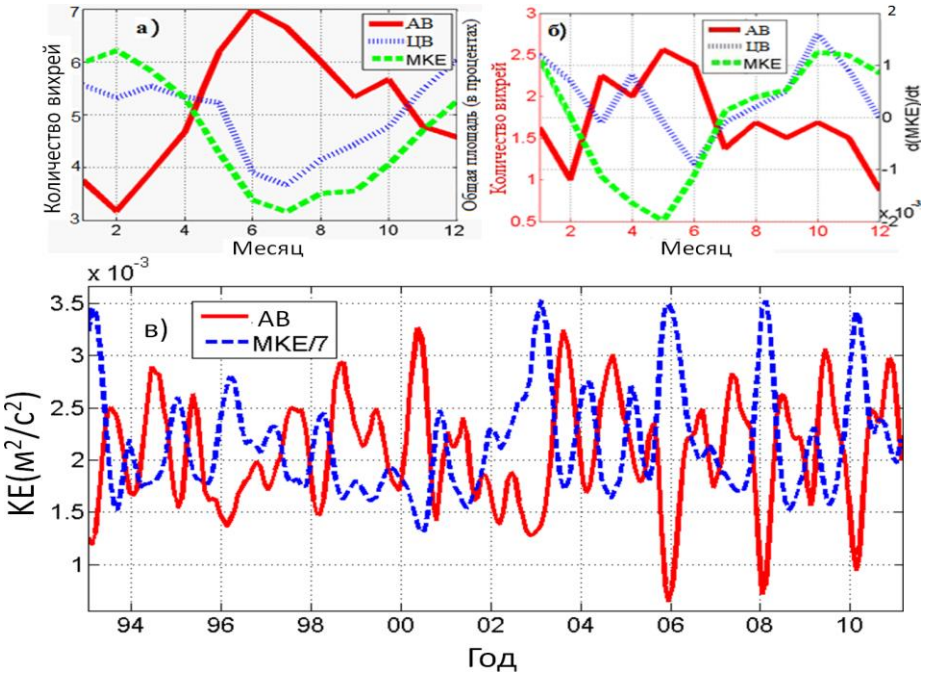

Рисунок 6 – Сезонный ход наблюдаемого по данным альтиметров: количества циклонов и антициклонов (а), количества генерируемых вихрей в каждом месяце и временной производной *МКЕ* ($\frac{\partial МКЕ}{\partial t}$) (б). Межгодовая изменчивость *МКЕ* (синяя линия) и суммарная энергии антициклонических вихрей Черного моря (красная линия) (3-месячное сглаживание) (в)

В пункте 1.2.4 проводится детальное исследование характеристик сезонной, межгодовой изменчивости и эволюции Батумского антициклона по спутниковым альтиметрическим и оптическим данным. Показано, что ослаблению и отрыву Батумского антициклона от места стационирования способствует увеличение локальной циклонической завихренности ветра в юго-восточной части Черного моря.

Подраздел 1.3 посвящён исследованию трехмерных характеристик вихрей по данным численного моделирования**. В пункте 1.3.1** разработан метод трехмерной автоматической идентификации вихрей Черного моря по данным численного моделирования, основанный на выделении замкнутых линий тока в поле скорости на каждом расчетном горизонте (рис. 3, в). Этот метод позволяет исследовать как статистические характеристики большого количества наблюдаемых вихрей в модели, так и особенности эволюции отдельных вихревых образований. На его основе по данным расчетов за 2005–2016 гг. с разрешением 10 км впервые исследованы вертикальное распределение геометрических (радиуса, толщины, наклона вертикальной оси) и динамических характеристик вихрей (скорости, завихренности) в различных районах Черного моря, их пространственная, сезонная и межгодовая изменчивость, изменение параметров вихрей в процессе их эволюции. Результаты согласуются с данными спутниковой альтиметрии и позволяют провести

анализ изменчивости вертикальных характеристик вихрей (рис. 7), а также дают возможность автоматического определения эволюции отдельных вихрей.

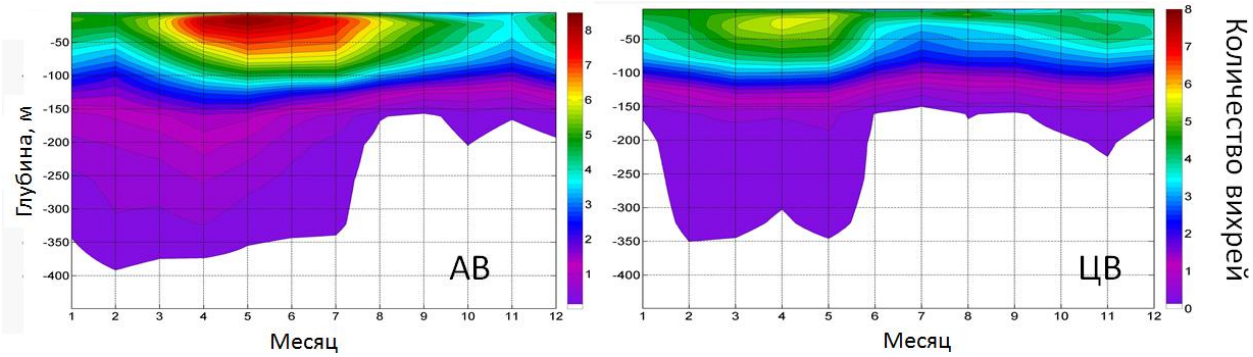

Рисунок 7 – Вертикальная диаграмма сезонной изменчивости: количества АВ (шт.) (а); количества ЦВ (шт.) (б) по данным численного моделирования

Эти методы используются **в подразделе 1.4** для исследования механизмов сезонной интенсификации антициклонов в морях с преобладающей циклонической циркуляцией**. В пункте 1.4.1** показано, что кросс-шельфовый перенос плавучести является важнейшим источником энергии для антициклонов Черного моря. На основе гидрологических измерений в 2016 г. на примере Керченского вихря демонстрируется, что аккумуляция опресненных Азовоморских вод вызывает двукратное увеличение его геострофической скорости. Детальное исследование эволюции ряда вихрей Черного моря по данным модели NEMO показывает, что вихри могут испытывать несколько периодов усиления (рис. 8).

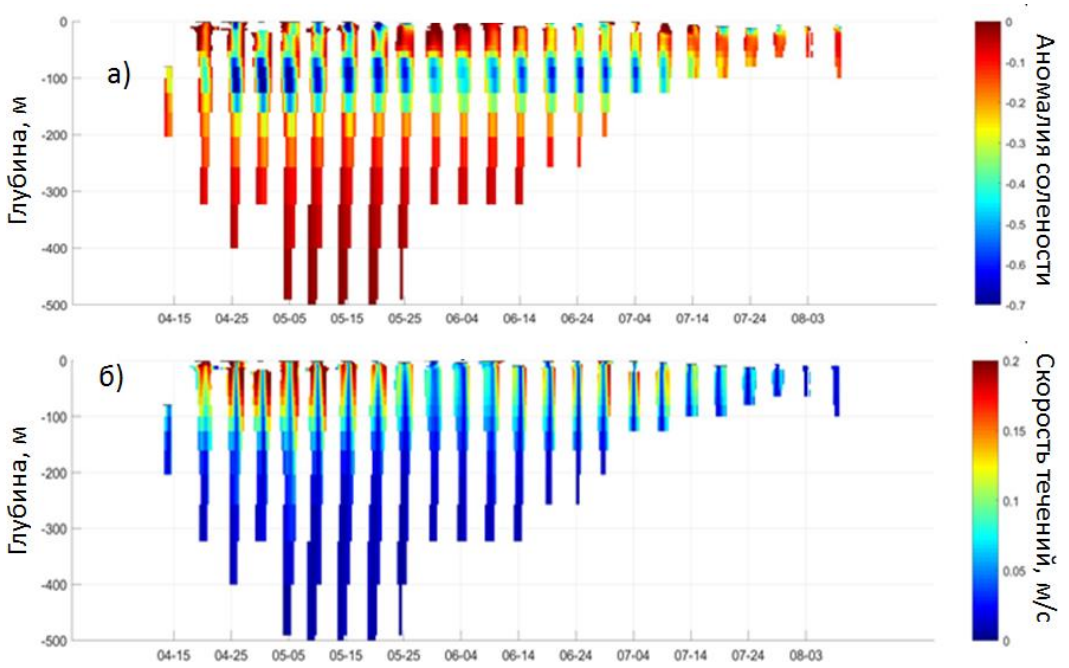

Рисунок 8 – Эволюция распределения: (а) аномалии солености (*s*, psu), (б) скорости (*Vmax*, м/с) в Керченском антициклоне №1255 в период его существования с 15 апреля по 3 августа 2006 г. Показан зональный разрез через центр вихря. Периоды интенсификации вихря совпадают с периодами появления пресной аномалии в его верхнем слое

Интенсификация вихрей связана с вовлечением шельфовых вод, которое вызывает рост аномалии солёности и скорости вихря не только в поверхностном слое, но и на глубине основного халоклина (рис. 9). Напротив, удаление вихря от кромки шельфа возле мысов, во всех изученных случаях приводит к ослаблению вихря.

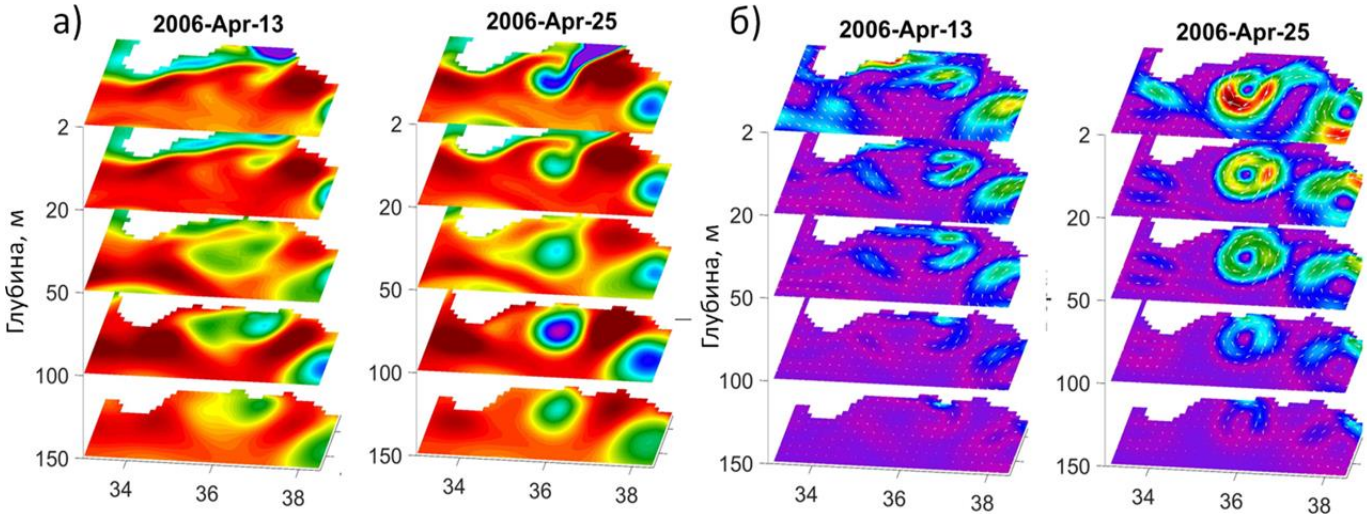

Рисунок 9 – Набор карт, отображающих вертикальные изменения пространственной структуры распределения: аномалии солености, psu (а); аномалии скорости, м/с, (б) в районе прохождения вихря, до захвата вод шельфа 13 апреля (слева), во время их захвата 25 апреля (справа)

Вовлечение опресненных вод в антициклон приводит к росту горизонтальных градиентов плотности и вызывает усиление нисходящих движений (рис. 10). Этот процесс в теплый период времени способствует опусканию сезонного термоклина и первоначальному росту динамической потенциальной энергии в вихре. В результате последующего усиления нисходящих движений происходит опускание основного халоклина. На этих глубинах, где градиенты плотности наиболее велики, значительно возрастает доступная потенциальная энергии в вихре, которая способна поддерживать существование вихря достаточно длительное время даже после его отрыва от источника пресных вод.

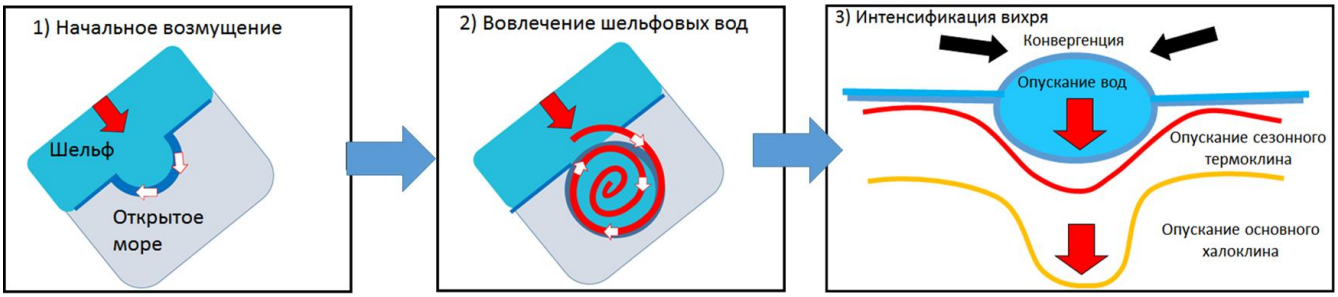

Рисунок 10 – Схема интенсификации антициклона, вызванной захватом опресненных вод шельфа

В пункте 1.4.2 на основе упрощенной модели точечного вихря исследована эволюция различных характеристик антициклонов при вовлечении шельфовых вод,

даны оценки влияния размеров вихря, плотности шельфовых вод на их изменчивость (рис. 11). Показано, что: скорость интенсификации вихря под влиянием вовлечения шельфовых вод определяется разницей плотности с водами шельфа и начальными значениями его орбитальных скоростей; максимальное значение скорости вихря ограничено величиной разницы плотности глубоководных и шельфовых вод; мелкие вихри интенсифицируются быстрее, чем крупные под действием вовлечения шельфовых вод.

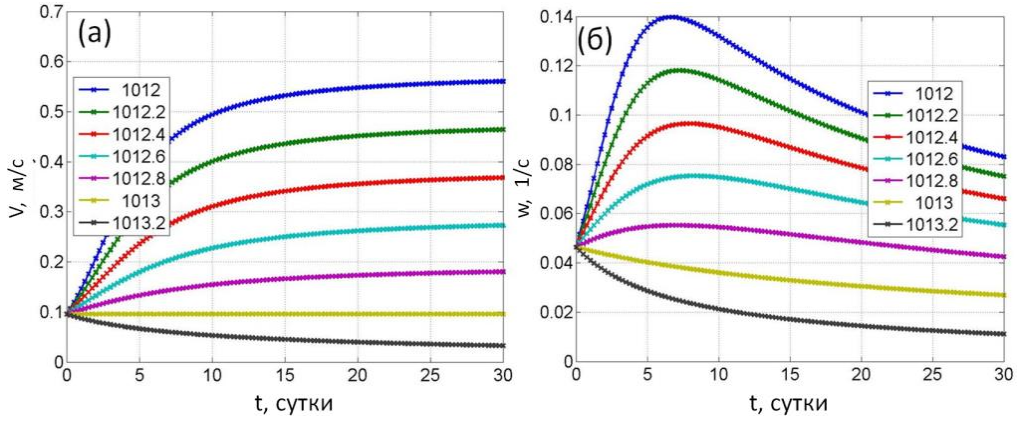

Рисунок 11 – Оценка изменения во времени скорости (а), завихренности (б) точеченого вихря после начала захвата опресненных шельфовых вод при различных значениях плотности шельфовых вод. Начальное значение плотности вод в вихре составляет 1013 кг/м^3

В пункте 1.4.3 на основе проведенного анализа временной изменчивости, вертикальной структуры и эволюции вихрей предложен механизм сезонной генерации антициклонов в Черном море. Воды, нагнанные зимой к берегу под действием экмановской дивергенции, при её уменьшении в теплый период начинают возвращаться обратно к центру моря. Происходит релаксация полей плавучести при ослаблении прибрежного даунвеллинга. Зоны высокой корреляции между уровнем моря и интегральной завихренностью ветра при увеличении сдвига по времени смещаются к центру бассейна (рис. 12). Этот процесс происходит неравномерно, при временном лаге более 3 месяцев эти зоны занимают три достаточно обширных локальных области: в северо-западной, в северо-восточной частях и на юго-востоке, соответствующих зонам максимальной вихревой активности – Севастопольскому, Керченскому и Батумскому вихрям.

Отток опресненных вод в центральную часть моря вызывает увеличение потенциальной энергии вод и способствует усилению антициклонов, которые могут первоначально образовываться в результате, например, топографической неустойчивости течений. Развивающиеся вихри захватывают в свои орбитальные движения шельфовые воды, что приводит к росту их потенциальной энергии и их дальнейшему усилению. Районы наиболее интенсивных вихрей наблюдаются вблизи зон максимальных градиентов плотности и привязаны к источникам опресненных вод, т.е. потенциальной энергии – северо-западному шельфу (СЗШ), Керченскому проливу и максимуму осадков в юго-восточной части моря (рис. 12, в),

соответственно, где скорость их роста согласно оценкам (рис. 11, а) должна быть максимальна.

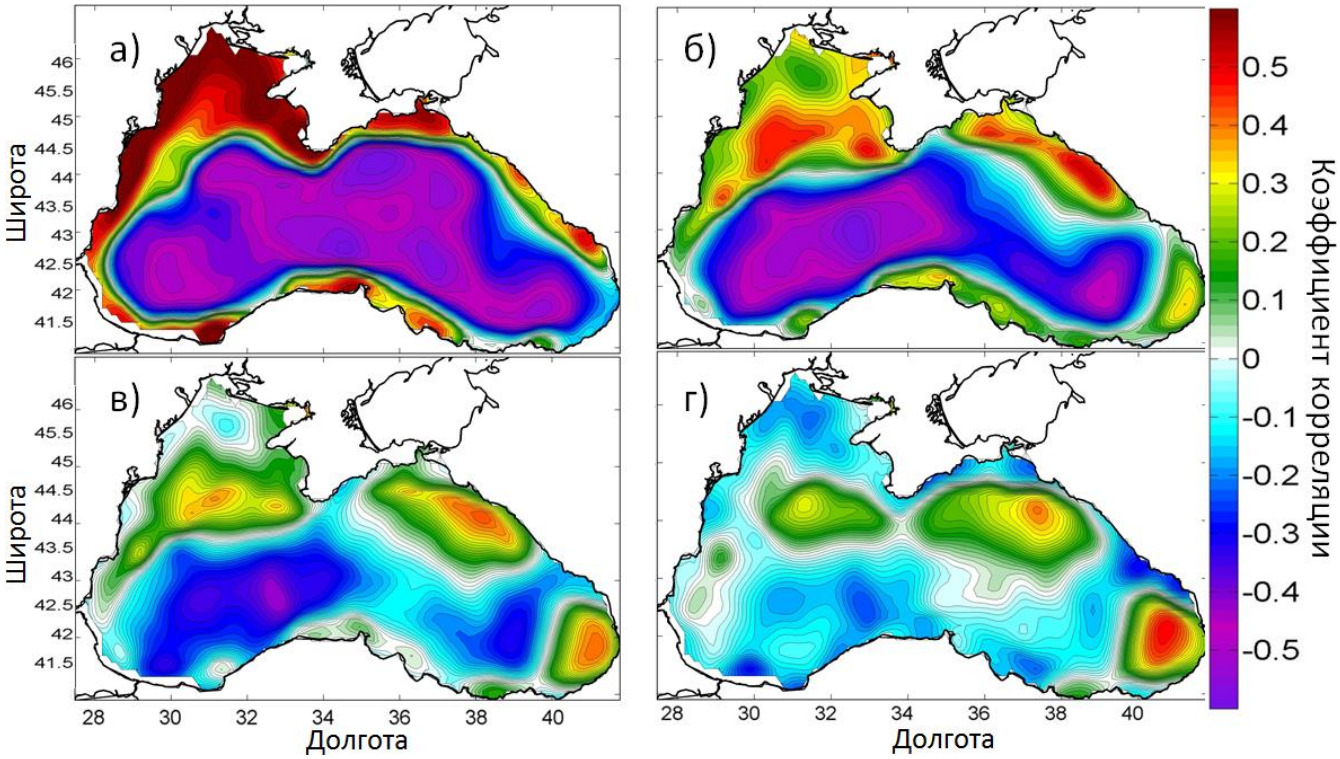

Рисунок 12 – Корреляция между интегральной завихренностью ветра и динамическим уровнем для временного лага: (а) 2 недели, (б) 6 недель, (в) 12 недель, (г) 16 недель

Увеличение экмановской конвергенции в осенний период приводит к усилению и прижатию струи ОЧТ к берегу, что вызывает сужение и разрушение антициклонов, находящихся над континентальным склоном бассейна. Описанный выше механизм (рис. 13, б) справедлив для любого стратифицированного замкнутого или полузамкнутого моря с циклонической циркуляцией. В Черном море имеется ряд особенностей: резкий халоклин, наличие особо мощных источников пресных вод – рек.

В пункте 1.4.4 проводится ряд численных экспериментов по исследованию интенсификации антициклонов при ослаблении циклонической циркуляции в круглом бассейне. На основе моделирования даны оценки скорости оттока вод (2–4 см/с) при ослаблении экмановской накачки (рис. 13, а). Нестационарный процесс оттока вод вызван приспособлением жидкости к полю тяжести и является функцией перепада плотности. Предложено упрощенное аналитическое решение, позволяющее учесть релаксацию поля уровня и описать сезонную изменчивость уровня при изменении завихренности ветра.

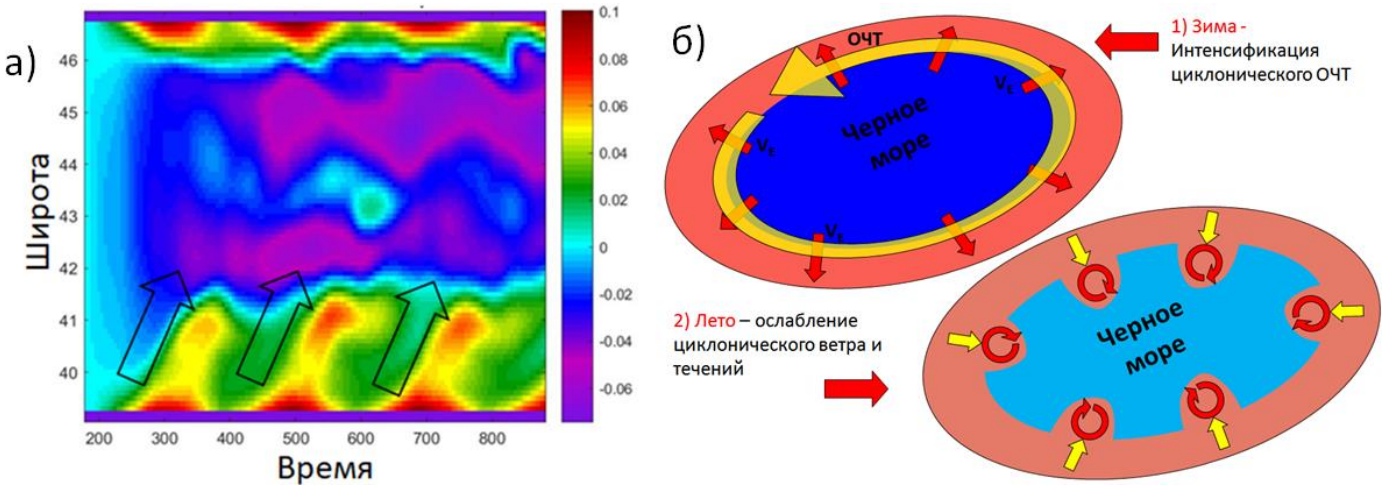

Рисунок 13 – Пространственно-временная диаграмма изменения уровня моря на зональном разрезе по расчетам модели POM в круглом бассейне, демонстрирующая сезонный отток вод от берега при ослаблении завихренности ветра (а). Схема изменения динамического режима Черного море от “струйного” к “вихревому” при ослаблении завихренности ветра (б)

В Разделе 2 на основе спутниковых измерений и лагранжевого моделирования исследуются физические механизмы влияния горизонтальной адвекции, вызванной действием крупномасштабной, вихревой динамики и дрейфовых течений, на распространение шельфовых вод и изменчивость концентрации хлорофилла А (Хл) в Черном море на различных временных масштабах.

Для оценки характеристик поверхностных течений **в подразделе 2.1** разработана оригинальная методика, позволившая параметризировать поверхностную дрейфовую скорость течений по данным о скорости ветра. Методика основана на анализе временной изменчивости скорости SVP-дрифтеров в период относительно стабильных геострофических течений, определяемых по данным альтиметров. Анализ временной изменчивости оценок угла поворота дрейфовых течений и амплитудного коэффициента на глубине паруса дрифтера 15 м относительно скорости ветра, показал, что эти величины связаны между собой в согласии с экмановской теорией (рис. 14). Используя эту зависимость, были определены коэффициенты ветрового

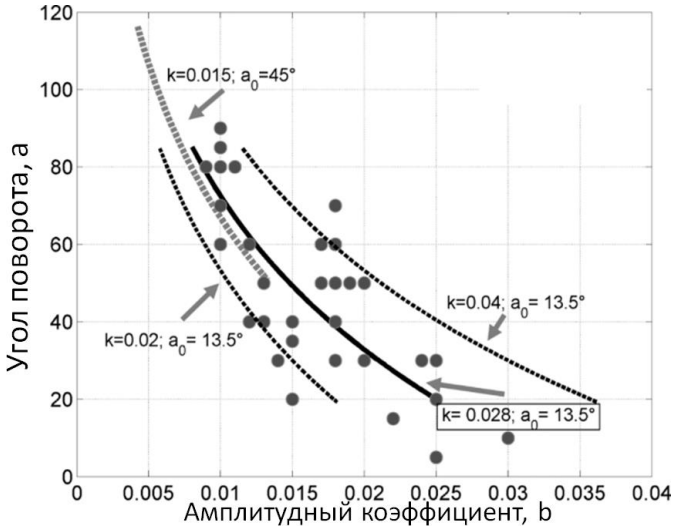

Рисунок 14 – Эмпирическая (точки) и теоретическая (линии) зависимости между коэффициентом амплитуды *b* и углом поворота *a* на глубине 15 м. Различные кривые построены с использованием разных коэффициентов *k* и угла a_0. Кривая с наилучшим соответствием (сплошная черная линия) соответствует k=0,028 и a_0=13,5°

дрейфа (k) и угол поворота дрейфовых течений на поверхности (a_0), которые составили 2,8% и 13° вправо, соответственно. При этом полученная параметризация скорости на поверхности не зависит от вертикальной структуры вод (от экмановской глубины), т.е. может быть использована в различных гидрометеорологических условиях.

В подразделе 2.2 на основе проведенной параметризации и данных альтиметрических измерений разработаны лагранжевы методы расчета перемещения плавающих объектов на поверхности океана, основанные на спутниковых измерениях и метеоданных. Методы были успешно опробованы на основе сопоставления с данными последовательных радиолокационных и оптических снимков в различных морях Мирового океана. На их основе в виде отдельного приложения была создана система расчета перемещения плавающих объектов FOTS (Floating Object Tracking System). Система была дополнена разработанной моделью растекания и выветривания нефти, учитывающей процессы растекания пленки в различных режимах (гравитационно-инерционном, гравитационно-вязким и режиме поверхностного натяжения), диспергирования, испарения и эмульсификации нефти, что позволило описывать изменение толщины и объема нефти в процессе эволюции пятна на основе спутниковых измерений. Результаты моделирования толщины нефтяной пленки хорошо совпадают с данными, полученными многоугловым методом по радиолокационным измерениям (рис. 15). Модель внедрена и используется для прогнозирования распространения нефтяных разливов в различных районах Мирового океана на морском портале инженерно-технологического центра «Сканекс».

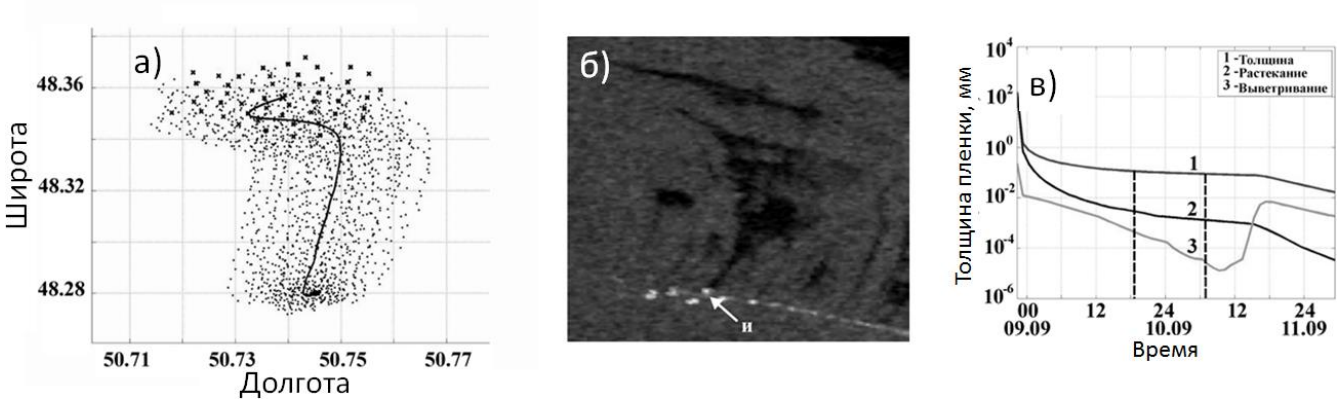

Рисунок 15 – Результаты моделирования разлива малого пятна в районе Нефтяные Камни: (а) траектории перемещения рассчитанных центров масс частиц пятна (сплошная линия), (б) фрагмент РЛИ РСА *Envisat*–1 10.09.2004 г., соответственно; (в) временная зависимость изменения толщины малого пятна (кривая 1) и вклад растекания (2) и выветривания (3) в изменение толщины

В подразделе 2.3 созданные лагранжевы методы используются для изучения межгодовой изменчивости ареалов распространения дунайских вод в летний период 1992–2015 гг. Для расчета траектории плюма вблизи устья Дуная располагаются четыре постоянных источника лагранжевых частиц, траектории которых рассчитываются с использованием данных о геострофической и дрейфовой

скорости по схеме Рунге-Кутта. На границах бассейна устанавливается условие скольжения частиц. Для анализа используется накопленная концентрация частиц, рассчитанная как общее количество частиц, проходящих через каждый бокс сетки с разрешением 0,05°x0,05° в течение определенного периода времени. Сопоставление результатов моделирования с оптическими измерениями MODIS показало пригодность этого метода, как для описания среднего направления смещения плюма, так и для описания его захвата вихревыми структурами.

Анализ расчетов и измерений цвета океана показывает, что распространение плюма в разные годы можно субъективно разделить на четыре основных типа (рис. 16). При преобладающих северо-восточных ветрах, сопровождающихся усилением завихренности ветра и ростом стока Дуная, вдольбереговое южное течение перемещает воды Дуная на юг вдоль западного побережья (“западный” тип). Интенсивное ОЧТ, небольшое количество вихрей и нагонные ветры существенно снижают кросс-шельфовый обмен питательными веществ в бассейне.

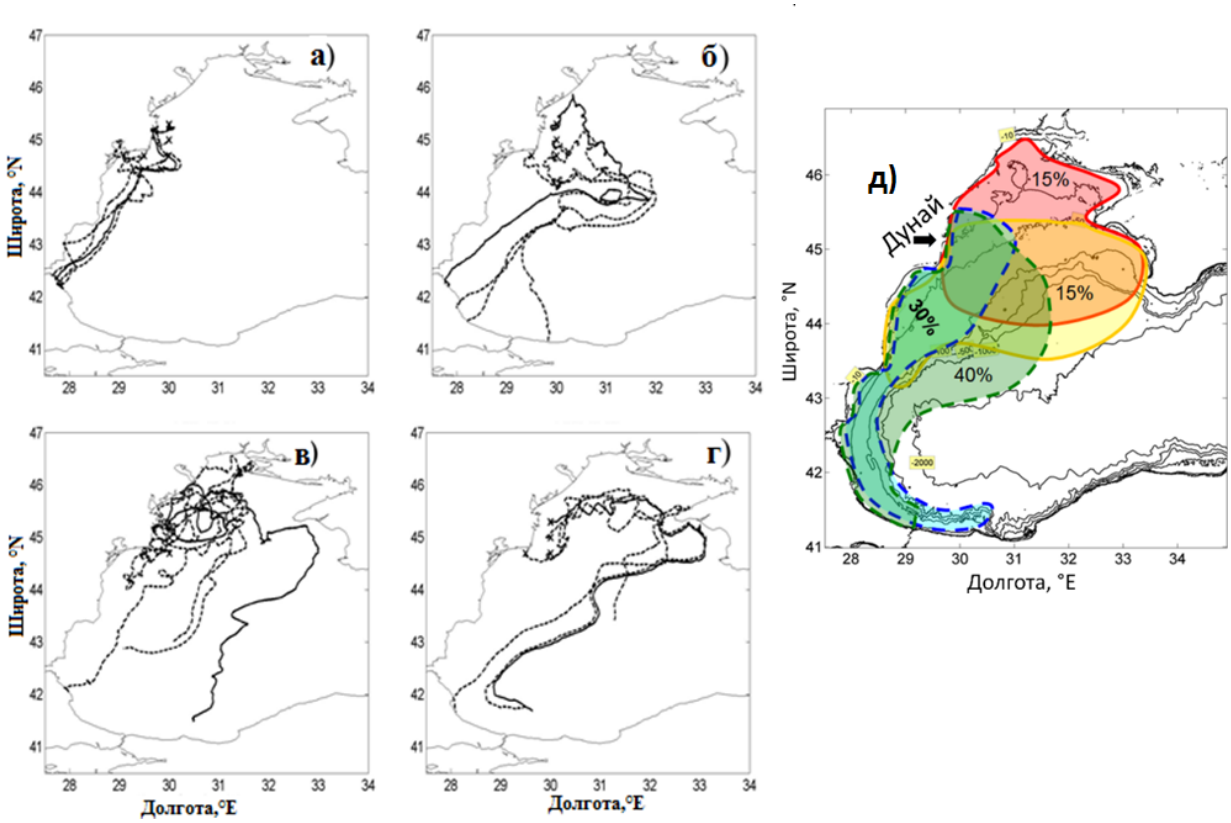

Рисунок 16 – Примеры траекторий движения виртуальных частиц от устья Дуная для разных типов распространения: (а) – «западного» типа (частицы выпущены 16 мая 2002 г.); (б) – «юго-восточного» типа (частицы выпущены 9 июня 2008 г.); (в) – «северного» типа (частицы выпущены 1 мая 2007 г.); (г) – «восточного» типа (частицы выпущены 30 июня 2000 г.); (д) – схема, демонстрирующая районы Черного моря, подверженные влиянию плюма в летний период во время различных типов распространения: синий цвет – «западный» тип; зеленый – «юго-восточный» тип; красный – «северный» тип; желтый – «восточный» тип

В годы с преобладанием юго-восточных ветров завихренность ветра менее сильна, что приводит к ослаблению ОЧТ и генерации синоптических антициклонов

(“вихревой” тип). Кратковременные юго-восточные дрейфовые течения вносят значительный вклад в перенос плюма через бровку шельфа, где они могут эффективно захватываться синоптическими вихрями и переноситься в глубоководную западную часть бассейна.

При преобладании западных ветров Дунайские воды под действием дрейфовых течений и орбитальных движений на северной периферии синоптических антициклонов движутся на восток к западному побережью Крыма (“восточный” тип).

Наконец, в годы с жарким летом, когда муссонный эффект вызывает образование сильной антициклонической ветровой ячейки над СЗШ, северные ветры переносят Дунайский плюм на север СЗШ, запирая плюм на шельфе. Антициклоническая циркуляция ветра приводит к конвергенции пресных поверхностных вод в центре шельфа и формированию геострофического антициклона в северной части СЗШ. Этот антициклон захватывает воды Дуная и долгое время удерживает их на шельфе (“северный” тип).

Межгодовая изменчивость распространения вод Дуная перераспределяет питательные вещества и взвесь, значительно влияя на пространственное распределение концентрации хлорофилла А (далее Хл) в западной части Черного моря (рис. 17). В годы с «западным» типом (~40% случаев) питательные вещества транспортируются вдоль западного берега, не расходуясь на обмен с центральной частью моря. В результате Хл у западного, юго-западного и южного побережья значительно выше, чем в среднем. В эти годы наблюдается отрицательная аномалия Хл в восточной и центральной части СЗШ, поскольку питательные вещества из Дуная не попадают в эту часть моря. В годы с “юго-восточным” типом (30 % случаев) вихревая горизонтальная адвекция приводит к образованию округлой зоны с повышенным содержанием Хл в южной части СЗШ и на северо-западе глубоководной части Черного моря.

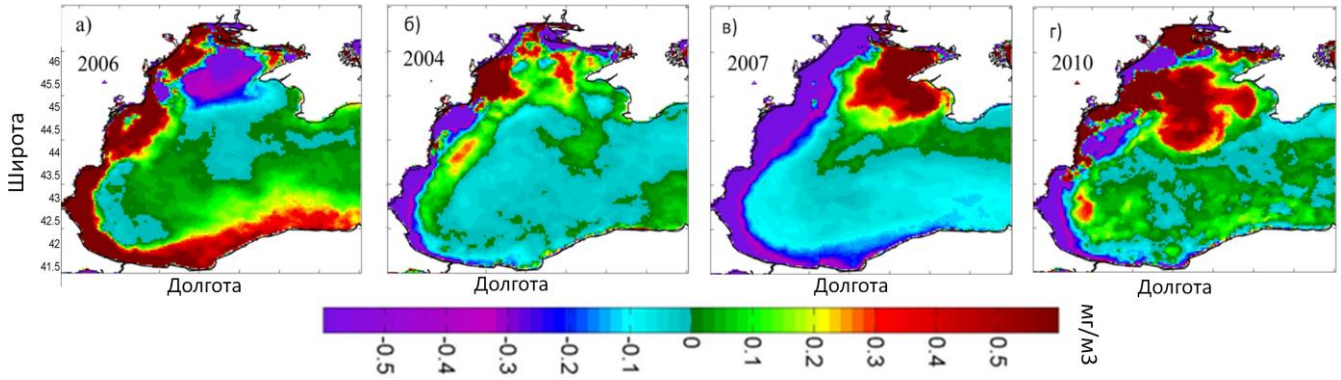

Рисунок 17 – Аномалия Хл относительно среднеклиматических значений за 2003–2015 гг. для периодов: (а) июль–август 2006 г., «западный тип»; (б) июль–август 2004 г., «юго-восточный» тип; (в) июль–август 2007 г., «северный» тип; (г) июнь 2010 г., «восточный» тип

В годы с «северным» типом распространения (15% случаев) наибольшие положительные аномалии Хл находились в центральной и восточной частях СЗШ (рис. 17, в), отрицательные аномалии – вдоль западного побережья. Во время

«восточного» типа распространения (15% случаев) положительная аномалия Хл отмечается к востоку от устья Дуная над южной частью СЗШ и вблизи западного побережья Крыма (рис. 17, г). Ситуация в эти годы аналогична годам с «северным» типом распространения: питательные вещества блокируются на СЗШ. Однако эта блокировка менее сильна из-за того, что воды плюма расположены не во внутренней северной части СЗШ, а в его южной части, где они могут быть захвачены проходящими синоптическими вихрям.

Подраздел 2.4 посвящен исследованию влияния кросс-шельфового обмена на интегральную изменчивость Хл в Черном море. Для анализа используется усовершенствованный массив Хл за 1998–2013 гг., который был получен с помощью предложенного алгоритма фильтрации и комбинирования данных MODIS и SeaWiFS. Анализ показал, что средняя поверхностная Хл в глубоководной части бассейна на масштабах 2 года и более находится в противофазе со средней кинетической энергией Черного моря (рис. 18, а). Интенсификации течений в 2002–2003 гг. привела к резкому снижению содержания Хл – на 25%, по сравнению с периодом его аномально высоких значений во время слабой циркуляции в 1998–2001 гг.

Усиление завихренности и циклонических течений приводит к увеличению мощности динамического барьера между шельфом и глубоководной частью моря, снижению количества синоптических антициклонов и связанного с ним горизонтального транспорта биогенных элементов. Наиболее значимый эффект наблюдается в зоне действия синоптических вихрей – на континентальном склоне, а также в центре и на востоке северо-западного шельфа, где коэффициенты корреляции между *MKE* и Хл равны −0,6…−0,8 (рис. 18, б). Уменьшение вихревого кросс-шельфового транспорта приводит к снижению Хл во всем бассейне, за исключением его западного шельфа, где Хл возрастает т.к. усиливается “западный” тип распространения дунайских вод.

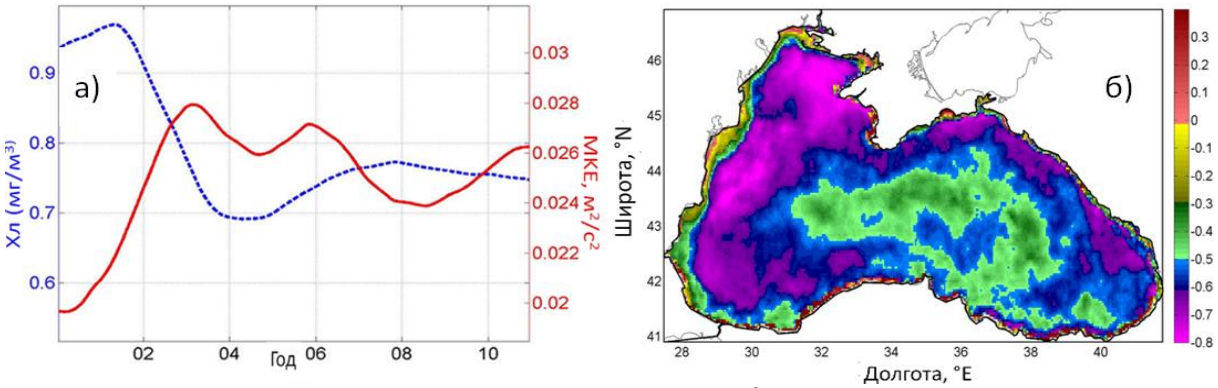

Рисунок 18 – Межгодовая изменчивость Хл (мг/м^3, синяя линия) в глубоководной части моря и средней кинетической энергии поверхностных геострофических течений – *MKE* (м^2/с^2, красная линяя) (а). Карты коэффициентов корреляции между Хл в каждой точке и осредненной по площади бассейна *MKE* (ряды сглажены однолетним скользящим средним) (б)

Обнаруженная связь подтверждается рядом совместных биологических исследований (Mikayelyan et al., 2019). Кроме этого, отмечено, что по литературным данным в периоды резкого ослабления завихренности ветра в 1983, 1990, 2000,

2007 гг. в черноморской экосистеме возникают аномальные ситуации. В частности, по данным предыдущих биологических исследований в эти годы наблюдалось вселение гребневиков, интенсивный рост мезозоопланктона, крупных диатомовых, что свидетельствует о значительном влиянии динамики и кросс-шельфового обмена на трофическую структуру Черного моря.

В **Разделе 3** на основе массива гидрологических и спутниковых измерений изучается ряд механизмов влияния динамических процессов на изменчивость термохалинной структуры и стратификации вод Черного моря.

В **подразделе 3.1** исследуется влияние интенсификации ветрового и динамического воздействия на изменчивость термохалинной структуры вод Черного моря в изопикнических координатах. Анализ массива гидрологических измерений за 1985–2019 гг. демонстрирует рост температуры и постепенное осолонение вод Черного моря в слое выше основного халоклина. При этом наиболее резкое осолонение верхних слоев наблюдается в последние годы (2014–2019), когда соленость в центральной части моря на глубине 20 м увеличилась на более чем 0,3 psu от значения 18,15–18,2 psu до 18,5 psu (рис. 19). Одной из важных причин такой изменчивости является усиление вертикального обмена, связанного с динамическими факторами.

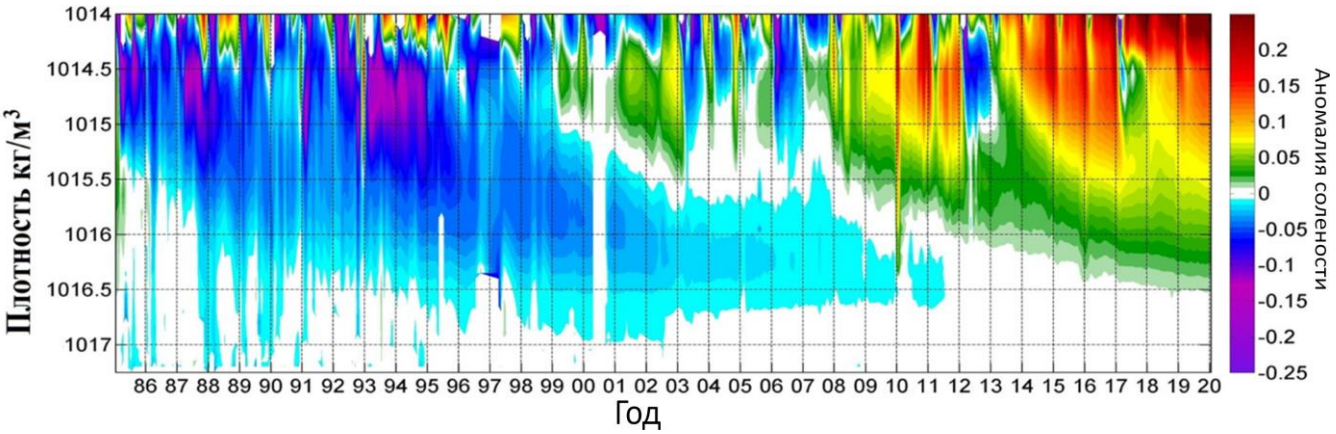

Рисунок 19 – Межгодовая изменчивость аномалии солености в глубоководной части Черного моря в изопикнических координатах в 1985–2019 гг.

Детальный анализ изменения аномалии солености и температуры в изопикнических координатах позволяет выделить два различных типа событий, влияющих на термохалинную структуру бассейна:

– в годы с суровыми зимами и интенсивной зимней конвекцией наблюдается уменьшение температуры на изопикнах 1014,0–1015,5 кг/м^3 (красные овалы на рис. 20), которое компенсируется падением солености на соответствующих изопикнах на 0,1–0,2 psu. Отчетливо такие события наблюдались по данным буев Арго после наиболее суровых зим в 2006, 2012 и в 2017 г. Зимняя конвекция в период интенсивного выхолаживания является важным механизмом поступления опреснённых вод в нижележащие изопикнические слои бассейна, которое происходит при формировании ХПС. Этот процесс приводит к уменьшению солености в верхнем слое халоклина и росту халинной стратификации. После окончания конвекции сигнал опреснения/выхолаживания относительно медленно

проникает в нижележащие изопикнические слои бассейна (до 1016,2 кг/м^3) под действием турбулентного перемешивания;

– в ряде лет наблюдается поступление теплых поверхностных вод в нижележащие изопикнические слои бассейна (синие овалы на рис. 20). Так в конце 2014 г. воды с температурой (T) более 9,5°С распространяются вглубь вплоть до изопикны 1014,7 кг/м^3. Такое резкое потепление глубинных изопикнических слоев было отмечено по измерениям заякоренного буя «Аквалог» в (Ostrovsky, Zatsepin, 2016). Эти события сопровождаются резким компенсирующим увеличением солености на этих изопикнах на 0,1–0,2 psu. В последнее время частота таких событий значительно увеличилась. В частности, в 2006–2019 гг. они наблюдались по данным Арго в конце 2010, 2011, 2014, 2015 и 2016 гг. Анализ измерений скорости буя профилемера Аквалог показал, что такие события связанны с усилением вертикального сдвига скорости в теплый период. На сезонных масштабах они наблюдаются в осенний период, предшествующий зимней конвекции. Сдвиговое турбулентное перемешивание во время существования теплого верхнего слоя вызывает проникновение теплых вод в нижележащие изопикнические слои, которое компенсируется вовлечением глубинных соленых вод из слоя халоклина.

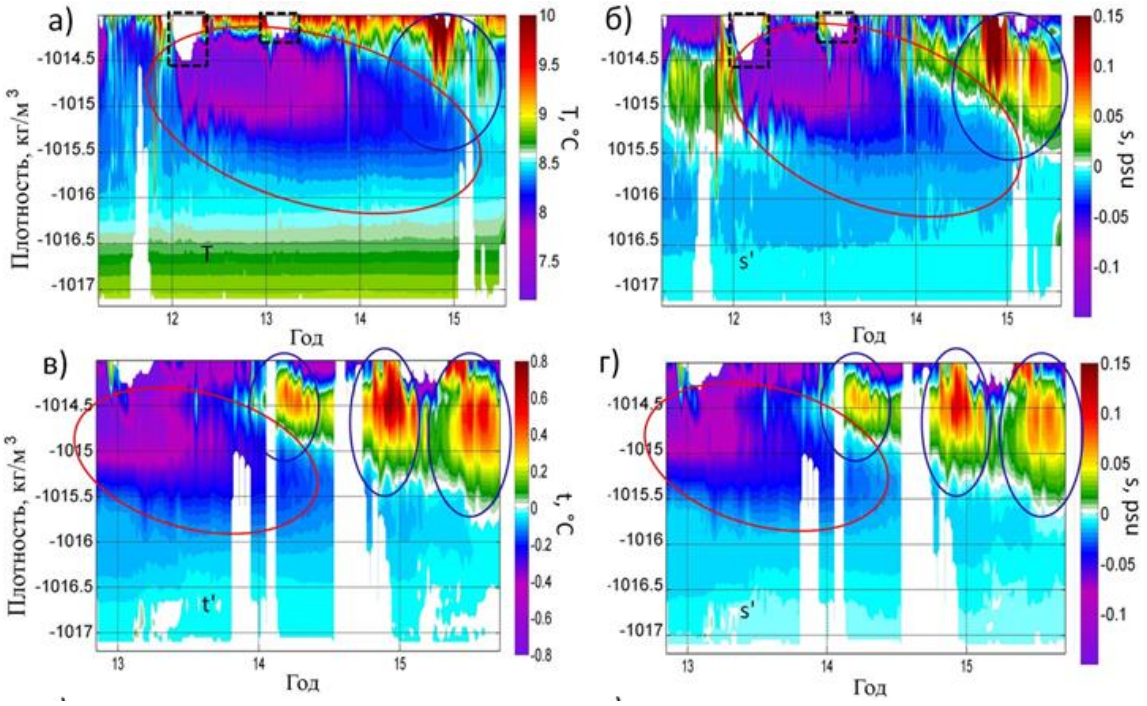

Рисунок 20 – Изменения в изопикнических координатах температуры (а); аномалии солености по данным буя Арго №6900805 (б); аномалии температуры (в) и аномалии солености (г) по данным буя Арго №6901961. Красные овалы выделяют процессы выхолаживания/опреснения, синие – потепления/осолонения

Причиной такого усиления может выступать интенсификация ОЧТ и воздействие штормовых ветров. Диаграмма (рис. 21, а) демонстрирует отклик вертикального распределения солености на изменение скорости ветра в теплый период времени (T>10°С). Усиление скорости ветра приводит к увеличению аномалии солености (и температуры) и их проникновению в более глубинные слои.

Во время наиболее мощных штормов (15–20 м/с) наибольшие аномалии, более 0,15 psu, возникают на глубине пикно-халоклина 1014,5–1015 кг/м^3, а значимые изменения солености вод (более 0,05 psu) наблюдаются вплоть до изопикны 1016 кг/м^3. Таким образом, воздействие сильных ветров приводит к размытию халоклина, что, в первую очередь, вызывает возникновение наблюдаемых аномалий.

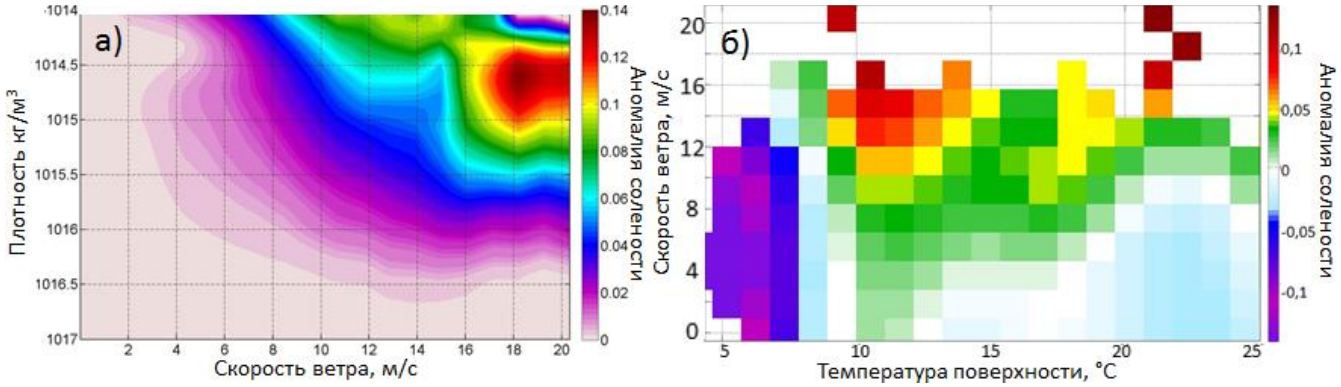

Рисунок 21 –Зависимость аномалии солености на различных изопикнах от скорости ветра в теплый период времени (температура верхнего слоя более 10°С) (а). Зависимость аномалии солености на изопикне 1014,5 кг/м^3 от скорости ветра и температуры поверхности (б)

Этот процесс обмена происходит со скоростью на порядок превышающей скорость обмена, вызванного конвективным выхолаживанием. На сезонных масштабах потепление и осолонение изопикнических слоев 1014–1015,4 кг/м^3 происходит осенью во время осенних штормов в октябре–декабре, а затем сменяется в январе–марте на опреснение/выхолаживание под действием зимней конвекции. Резкое вовлечение теплых вод во время сильных осенних штормов в нижние слои является одним из важных факторов исчезновения холодного промежуточного слоя. При этом в холодный период года этот эффект имеет противоположный знак и вызывает вовлечение холодных вод в нижние слои и соленых вод в верхний (аналогично зимней конвекции) (рис. 21, б).

Долговременный рост температуры Черного моря в зимний период привел к тому, что температура верхнего слоя даже во время максимального выхолаживания превышает температуру пикноклина. В результате этого, действие сдвигового турбулентного перемешивания в зимний период также вызывает увеличение температуры и солености нижних изопикнических слоев. Вместе с этим процесс опреснения глубинных слоев, связанный с формированием ХПС, значительно ослаб и наблюдается только в очень холодные годы. В то же время наблюдается интенсификация скорости и завихренности ветра и связанное с ним усиление ОЧТ.

Все эти процессы приводят к размытию халоклина и резкому увеличению солености верхних слоев, которое в последний период прослеживается вплоть до изопикн 1016,5 кг/м^3 (рис. 19) (что соответствует глубинам 200–250 м). Увеличение солености верхнего слоя вызывает уменьшение градиентов солености. Проведенный анализ показал, что вклад этого эффекта в 4–5 раз превосходит влияние потепления на изменение вертикального градиента плотности и вызывает ослабление халинной стратификации верхнего слоя Черного моря. Такие изменения

халинной структуры вод могут значительно влиять на особенности перемешивания и вовлечения биогенных веществ из слоя их подповерхностного максимума (подраздел 4.2).

В **подразделе 3.2** на основе разработанных композитных методов анализа спутниковых и гидрологических измерений исследуется термохалинная и динамическая структура вихрей. В **пункте 3.2.1** представлен метод исследования термохалинной структуры вихрей на основе композитного анализа исторических гидрологических измерений: данных буев Арго и данных спутниковой альтиметрии. На основе полученных методов исследованы вертикальное распределение аномалии температуры и солености в циклонах и антициклонах Черного моря, её связь с интенсивностью вихрей, сезонная изменчивость (рис. 22). Определена связь между интенсивностью вихря, положением пикноклина в нем и средними аномалиями солености, температуры и частоты Вяйсяля-Брента (рис. 23).

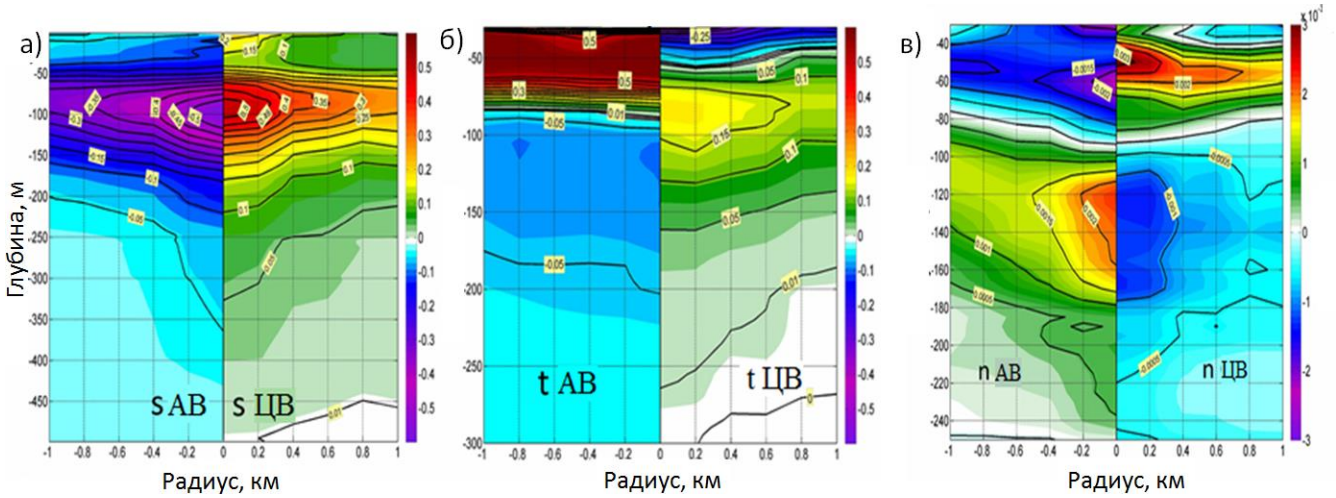

Рисунок 22 – Радиальная структура аномалии солености (psu) (а); аномалии температуры (°С) (б); аномалии частоты Вяйсяля-Брента (1/с) (в) в АВ и ЦВ

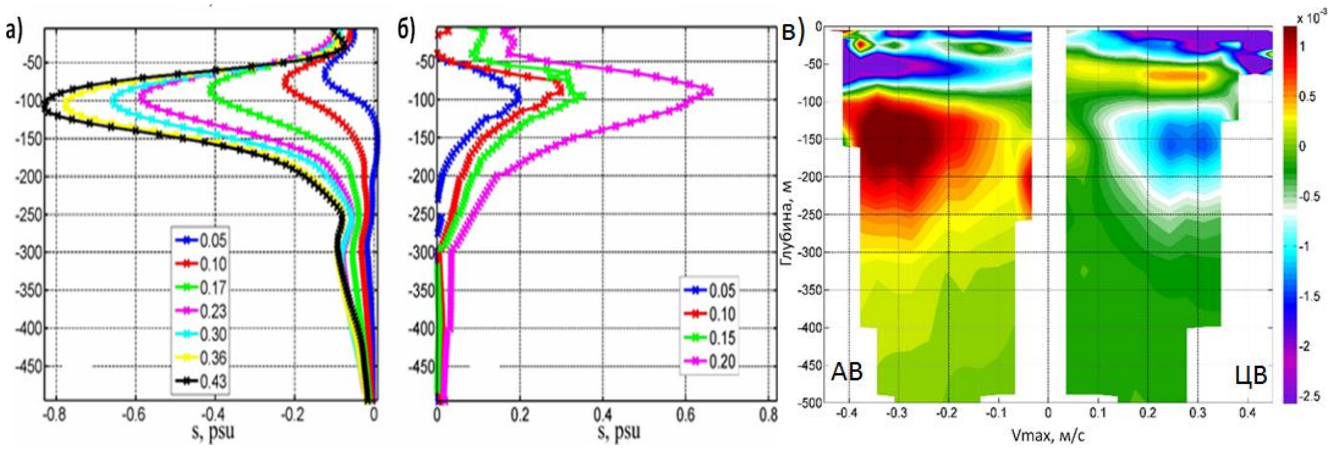

Рисунок 23 – Радиально усредненные профили аномалии солености (psu) в АВ (а), ЦВ (б) и аномалии частоты (1/с) Вяйсяля-Брента (в) в вихрях обоих знаков для различных значений максимальной орбитальной скорости вихря *Vmax*

На основе предложенной параметризации рассчитано пространственное распределение и сезонная изменчивость тепло– и солесодержания в вихрях

различного знака (рис. 24). На основе альтиметрических данных о скоростях перемещения вихрей получены карты транспорта вихрями соли и тепла. Скорости переноса тепла и соли в вихрях в районе континентального склона значительно ниже (~5 см/с), чем в ОЧТ (~20–40 см/с). Поскольку крупных антициклонов значительно больше в северной части, чем в южной, этот эффект приводит к накоплению пресных и холодных вод в слое ниже 50 метров на севере Черного моря, что может способствовать наблюдающейся зональной асимметрии полей температуры и солености в промежуточных слоях Черного моря.

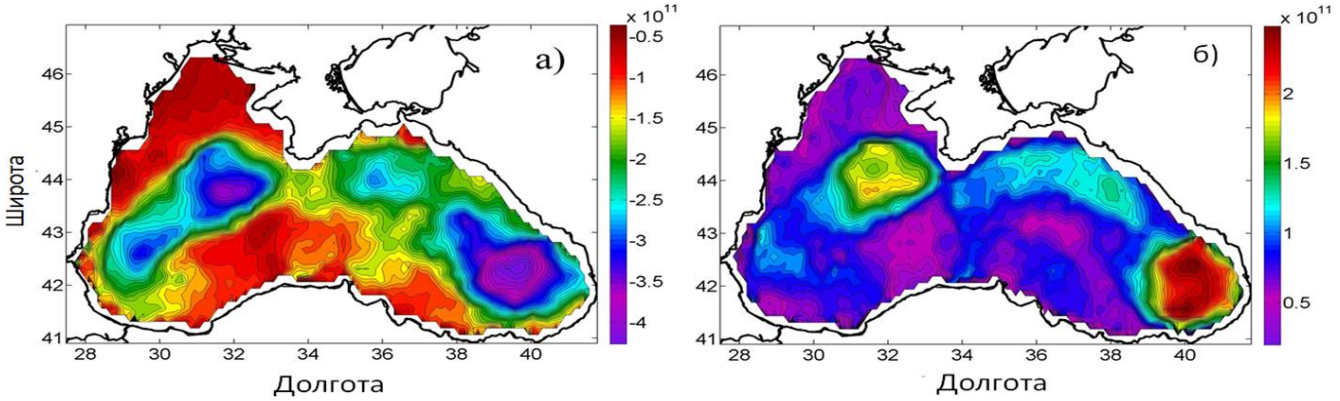

Рисунок 24 – Пространственное распределение: солезапаса (кг) в слое 20–500 м в вихрях: антициклонического (а), циклонического (б) знака в различных районах бассейна

Исследована эволюция динамических характеристик и термохалинной структуры в процессе существования вихря. В среднем до половины времени жизни вихревого образования его радиус и орбитальная скорость растут, после примерно 80% времени жизни вихря они начинают интенсивно убывать. В то же время средняя завихренность максимальна во время образования вихря и уменьшается на протяжении его дальнейшего существования. В первую половину жизни в антициклоне/циклоне пикноклин заглубляется/поднимается, достигая самого низкого/высокого положения в середине жизни вихря, а затем начинает подниматься/опускаться до исходных значений. На основе вертикального смещения изопикн оценены профили вертикальной скорости в вихрях различного знака. В процессе существования вертикальная скорость в вихре меняет свой знак. Для вихрей обоих знаков максимум вертикальной скорости наблюдается на глубинах пикно-халоклина в начальный ($-8\cdot10^{-6}$ м/с для АВ, $6\cdot10^{-6}$ м/с для ЦВ) и конечный период ($8\cdot10^{-6}$ м/с для АВ, $-20\cdot10^{-6}$ м/с для ЦВ) развития вихря.

Определена композитная структура аномалии частоты Вяйсяля-Брента в вихрях обоих знаков. В верхних слоях антициклонов (0–100 м) из-за аккумуляции вод с одинаковыми характеристиками и заглубления пикноклина стратификация ослабевает, а в слое 100–200 м имеет место значительное увеличение стратификации, вызванное сжатием изопикнических поверхностей в нижних слоях антициклона. В циклонах в слое 40–80 м стратификация усиливается из-за поднятия пикно-халоклина и уменьшается в глубинных слоях (100–500 м) с вторичным максимумом в слое ниже основного пикноклина (140–160 м). Наибольшие аномалии частоты Вяйсяля-Брента наблюдаются в верхнем слое (0–30 м), где они

отрицательны для вихрей обоих знаков и особенно велики для ЦВ. Причиной такого ослабления стратификации является интенсивный сдвиг орбитальных скоростей в верхней части вихрей, который приводит к росту турбулентного перемешивания, что подтверждается наличием выраженной зависимости между увеличением орбитальной скорости и уменьшением средней в слое 0–50 м аномалии частоты Вяйсяля-Брента (рис. 23, в).

В подразделе 3.3 на основе массива данных гидрологических измерений (более 30 тыс.) проведен анализ сезонной и межгодовой изменчивости значений толщины ВКС в Черном море за период 1985–2017 гг. под влиянием различных физических факторов. В холодный период года, когда основной пикно-халоклин ограничивает вертикальное перемешивание, на толщину ВКС значительное влияние оказывает динамика вод бассейна (рис. 25). В центральных районах моря, где пикноклин приподнят, толщина ВКС с января по март составляет 30–35 м, что на 7–15 м меньше, чем в районах континентального склона бассейна, где пикноклин заглублен. Максимальное значение толщины ВКС наблюдается в интенсивных синоптических антициклонах, где в среднем зимой они достигают 65–70 м, а минимальные – 25–30 м в циклонических синоптических вихрях. В ряде случаев зафиксированы экстремально высокие для Черного моря значения толщины ВКС, достигающие 100 м и даже 150 м. Все эти случаи относились к периферии бассейна к зоне опускания пикноклина. При этом даже при таких больших значениях толщины ВКС плотность его вод никогда не превышала 1015 кг/м^3, т.е. воды основного пикноклина, за исключением самой его верхней части, не вовлекаются в перемешивание и не вступают во взаимодействие с атмосферой.

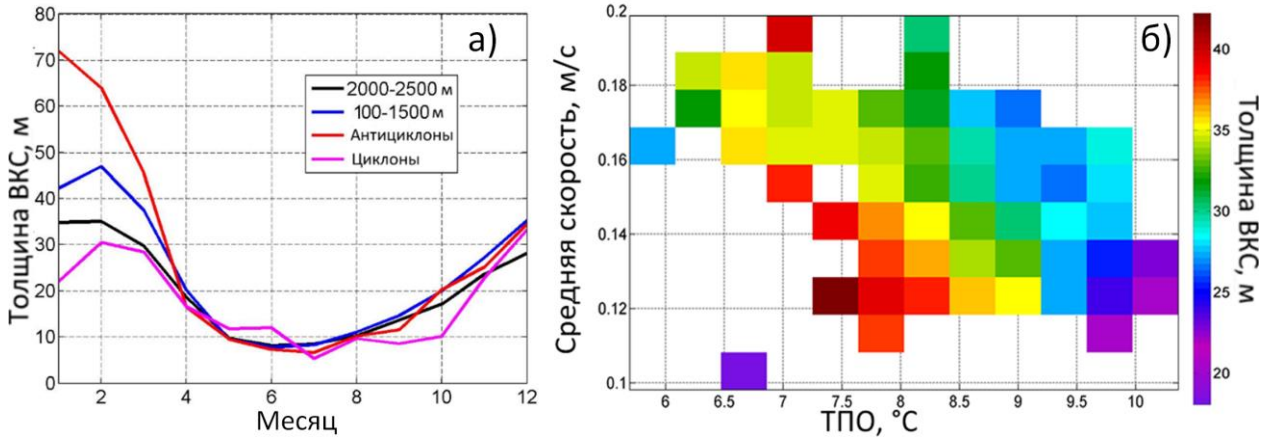

Рисунок 25 – Сезонная изменчивость толщины ВКС в центральной части моря (глубины больше 2000 м, черная линия), в районе континентального склона бассейна (глубины 100–1500 м, синяя линия), в антициклонических вихрях (красная линия), в циклонических вихрях (фиолетовая линия) (а). Зависимость средней толщины ВКС от средней по бассейну скорости течений и от температуры поверхности в центральной части Черного моря (б)

В период прогрева воздействие ветра является основным фактором, вызывающим изменчивость толщины ВКС. Слабые ветра в восточной части моря и сильные в юго-западной приводят к соответствующему пространственному распределению толщины ВКС с максимумом на западе и минимумом на востоке

бассейна. Влияние ветра наиболее значимо в весенний и осенний периоды ослабленной стратификации вод верхнего слоя и менее выражено летом, в период максимального прогрева и развитого термоклина. На межгодовых масштабах наблюдается выраженная положительная корреляция между толщиной ВКС и скоростью ветра в летний период. В последние годы (после 2013 гг.) отмечается рост летних значений толщины ВКС, связанный с интенсификацией летних штормов.

В Разделе 4 на основе спутниковых измерений, данных буев Био-Арго и полученных в Разделе 3 представлений исследуется влияние освещенности, вертикального перемешивания и адвекции на изменчивость основных биооптических характеристик Черного моря.

В пункте 4.2.1 на основе спутниковых оптических измерений исследуются причины аномально сильных летних цветений кокколитофорид в Черном море, когда их концентрация может в 10 раз превышать климатические значения. На основе анализа гидрологических данных показано, что такие события вызваны усилением вертикального вовлечения питательных веществ из глубинных изопикнических слоев в предшествующий зимний период (рис. 26). Плотность верхнего слоя в холодное время года может быть использована в качестве индикатора интенсивности вовлечения биогенных элементов и эффективного предиктора последующего цветения кокколитофорид в мае–июне.

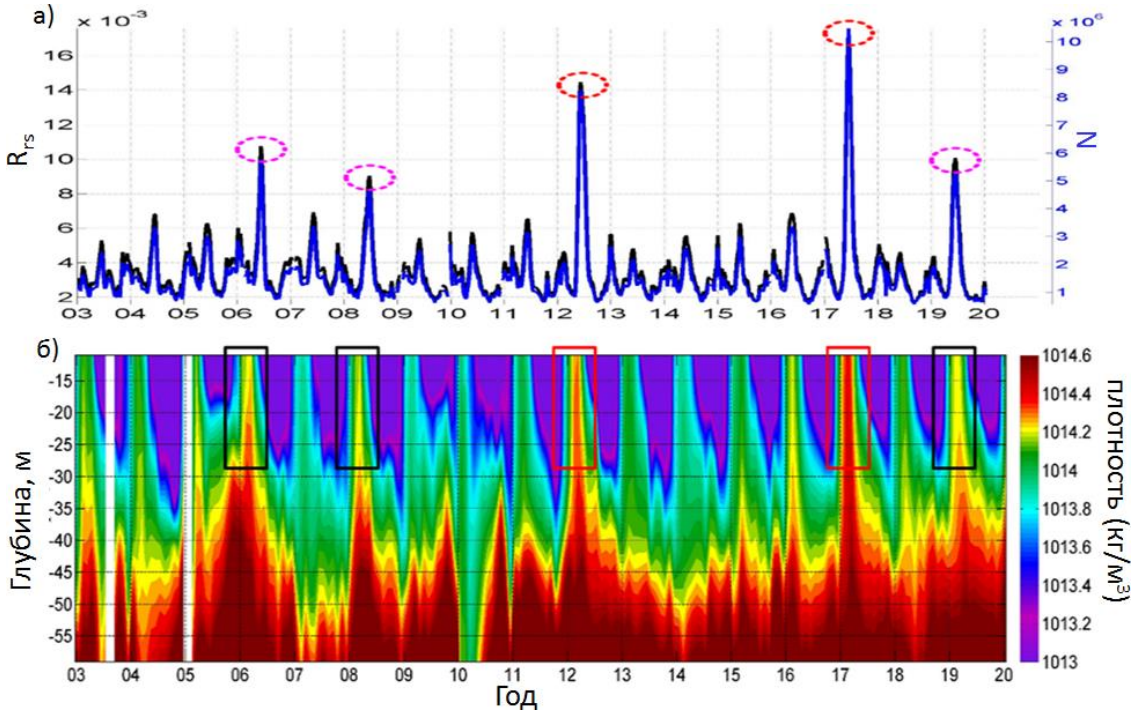

Рисунок 26 – Межгодовая изменчивость: средней по глубоководной части Черного моря (глубины более 500 м) яркости восходящего излучения R_{rs} (ср$^{-1}$, черный цвет) и концентрации клеток кокколитофорид N (клетки/л, синий цвет) по данным *MODIS* (а) вертикального распределения плотности (кг/м^3) в центральной части Черного моря в 2003–2019 гг. (глубины более 2000 м) по историческим гидрологическим данным и измерениям буев Био-Арго (б). Прямоугольники показывают зимы с аномально сильными цветениями (красный) и умеренно сильными цветениями(черный)

Резкий рост солености, связанный с интенсификацией динамических процессов, вызвал увеличение плотности верхних слоев и ослабление халинной стратификации, что приводит к чрезвычайно мощному цветению кокколитофорид, наблюдавшемуся в Черном море в последние годы (в 2012 и 2017 гг.), которые были теплее, чем холодные 2006 и 2008 гг.

В пункте 4.2.2 непрерывные пятилетние измерения обратного рассеяния (*bbp*) по данным буев Био-Арго в Черном море с высоким временным (несколько дней) и вертикальным (1 м) разрешением впервые были использованы для изучения сезонной и вертикальной эволюции цветений кокколитофорид в зимний и летний периоды года (рис. 27, а). Показано, что цветения кокколитофорид значительно влияют на характеристики освещенности в бассейне, поскольку их окончание сопровождается резким ростом показателя вертикального ослабления света *kd* (рис. 27, б). Максимум спектров ослабления света наблюдается в коротковолновом диапазоне, что свидетельствует о выбросе большого количества растворенного органического вещества (РОВ). Наиболее вероятной причиной наблюдаемого пика является образование автохтонного РОВ в результате вирусного лизиса клеток кокколитофорид.

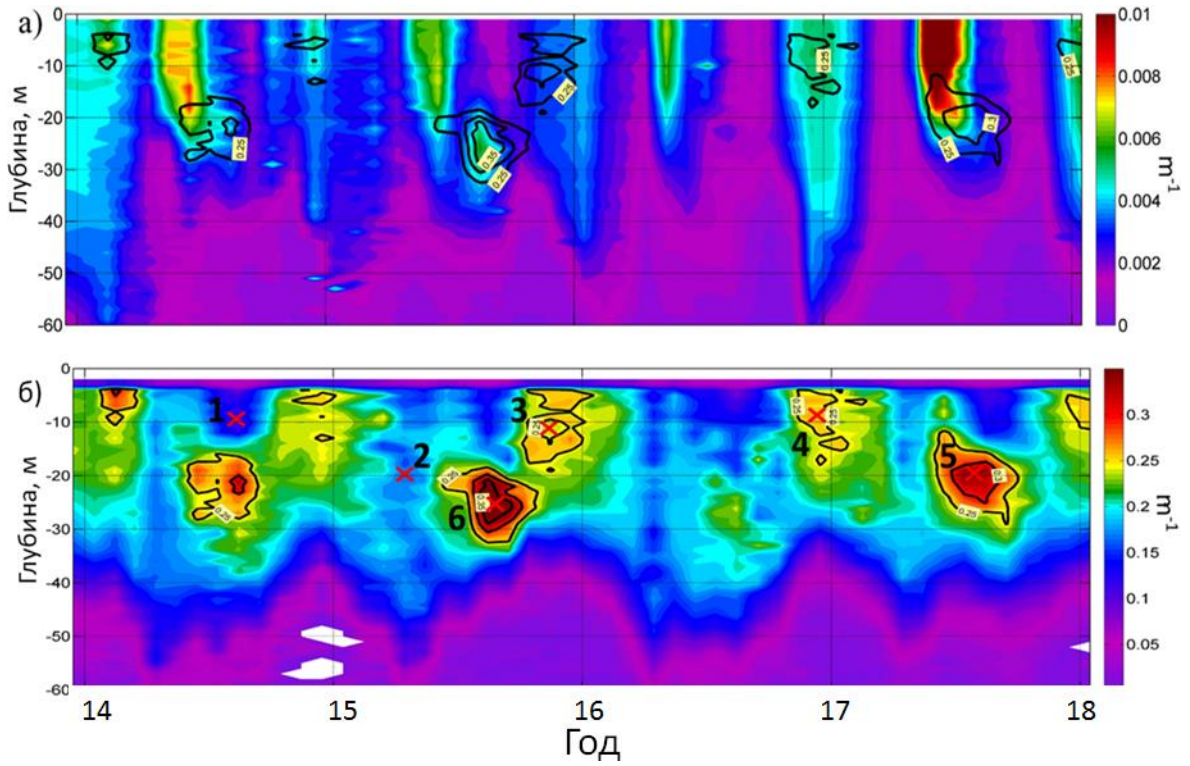

Рисунок 27 – Межгодовая изменчивость биооптических характеристик в центральной части Черного моря по данным Био-Арго: (а) *bbp* (м$^{-1}$); (б) *kd(412)* (м$^{-1}$); Черные контуры показывают изолинии *kd(412)*=0,25, 0,3, 0,35 м$^{-1}$

Анализ сезонной изменчивости *kd*(380) показал, что этот процесс приводит к сезонному максимуму РОВ в верхнем слое вод Черного моря, который наблюдается в июле–августе на глубинах 15–25 м. Резкое ослабление света, связанное с этим процессом, значительно ухудшает условия освещённости в летний период, что влияет на положение подповерхностного максимума концентрации хлорофилла А

(подраздел 4.5). Впервые показано, что цветение кокколитофорид в Черном море регулярно наблюдается в зимний период, что связано с влиянием интенсивных осенне-зимних штормов.

В подразделе 4.3 на основе непрерывных измерений буев Био-Арго за 2014–2018 гг. проведено детальное исследование сезонной и межгодовой изменчивости вертикального распределения фотосинтетически активной радиации (ФАР) и коэффициента ослабления света (рис. 28).

Показано, что сезонная изменчивость вертикального положения максимума Хл, в первую очередь, определяется вертикальным распределением абсолютных значений ФАР. Зависимость Хл от ФАР имеет гауссовский вид (рис. 28, б).

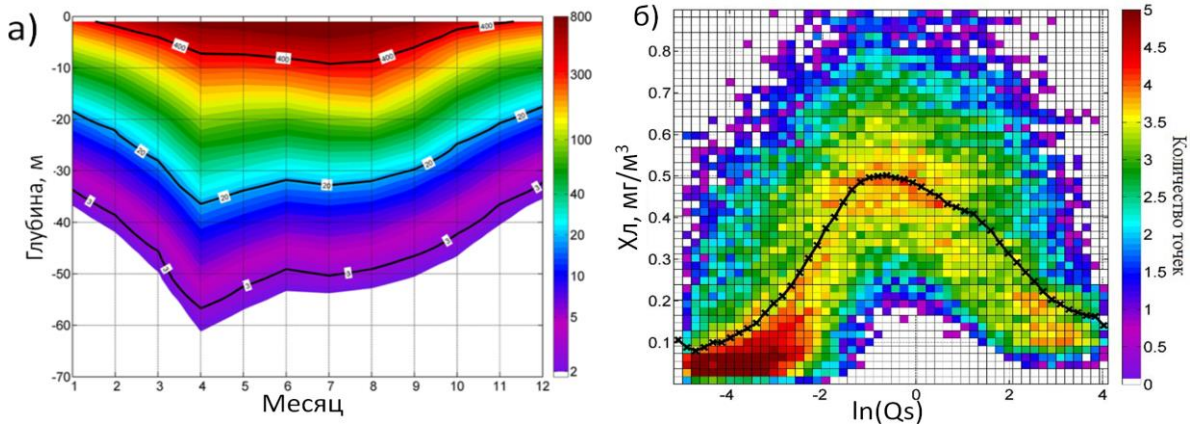

Рисунок 28 – Вертикальная диаграмма сезонной изменчивости ФАР (мкмоль фотонов $м^{-2}$ $с^{-1}$) (а). Зависимость Хл (мг/$м^3$) от ln(*Qs*), где *Qs* – общий суточный ФАР (моль фотонов $м^{-2}$ $сут^{-1}$) (б) (цвета показывают количество одновременных измерений, черная линия показывает среднюю зависимость)

Высокие значения Хл в течение всех сезонов находились между зоной с низкой мгновенной освещенностью *Ed* (3 мкмоль фотонов $м^{-2}$ $с^{-1}$) и высокой освещенностью (330 мкмоль фотонов $м^{-2}$ $с^{-1}$). Максимальное значение Хл наблюдалось вблизи изолинии *Ed*=20 мкмоль фотонов $м^{-2}$ $с^{-1}$, которая, по-видимому, близка к оптимальному балансу между условиями освещенности и концентрацией питательных веществ для развития фитопланктона.

В **подразделе 4.4** проведен детальный анализ изменчивости Хл на основе непрерывных измерений буев Био-Арго в 2014–2018 гг. Результаты показали, что изменчивость вертикального распределения Хл имеет пульсационный характер (рис. 29), который во-многом связан с влиянием физических факторов. Проведенный анализ позволил уточнить представления о сезонной изменчивости Хл и выделить 7 стадий (рис. 29, 30) его сезонного хода с различными особенностями вертикального распределения:

А. Февральский минимум Хл, когда по данным ряда буев наблюдается резкое уменьшение Хл во всей толще вод, связанное с заглублением ВКС ниже слоя компенсационной освещенности (рис. 29). Этот минимум модулируется динамическими факторами, поскольку наиболее высокие значения ВКС находятся в зонах данувеллинга на склоне и в синоптических антициклонах. В центре моря, где толщины ВКС меньше, этот минимум может отсутствовать, особенно в годы с интенсивной циклонической циркуляцией;

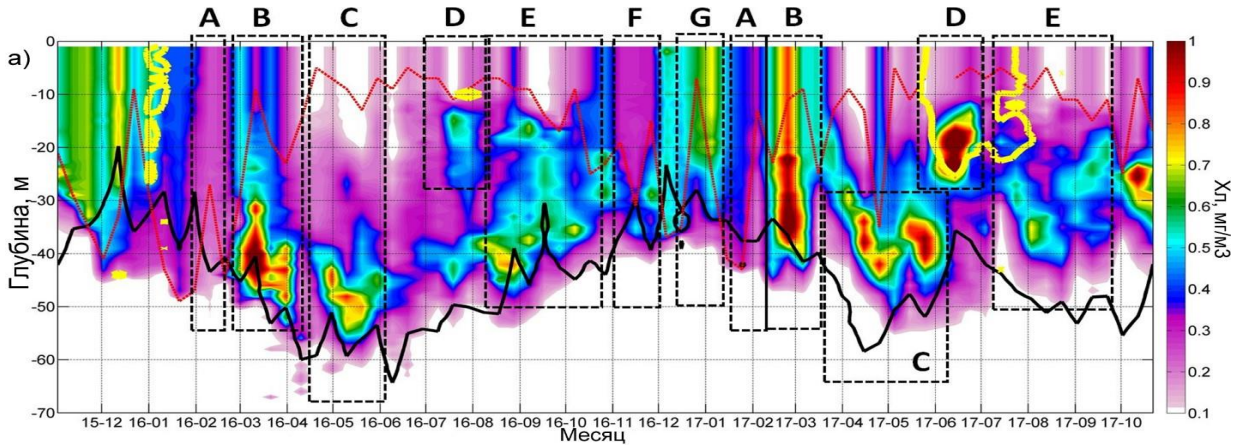

Рисунок 29 – Вертикальная изменчивость Хл (мг/м^3) с ноября 2015 г. по ноябрь 2017 г. по данным измерений Био-Арго №7900591. Черной линией показана изолиния *Ed*=3 мкмоль фотонов м$^{-2}$ с$^{-1}$, красной линией показана толщина ВКС. Желтым контуром показаны изолинии высоких значений *bbp* (*bbp*=0,005 м$^{-1}$), связанные с интенсивным цветением кокколитофорид. Черные пунктирные прямоугольники выделяют отдельные стадии изменчивости Хл (A–G)

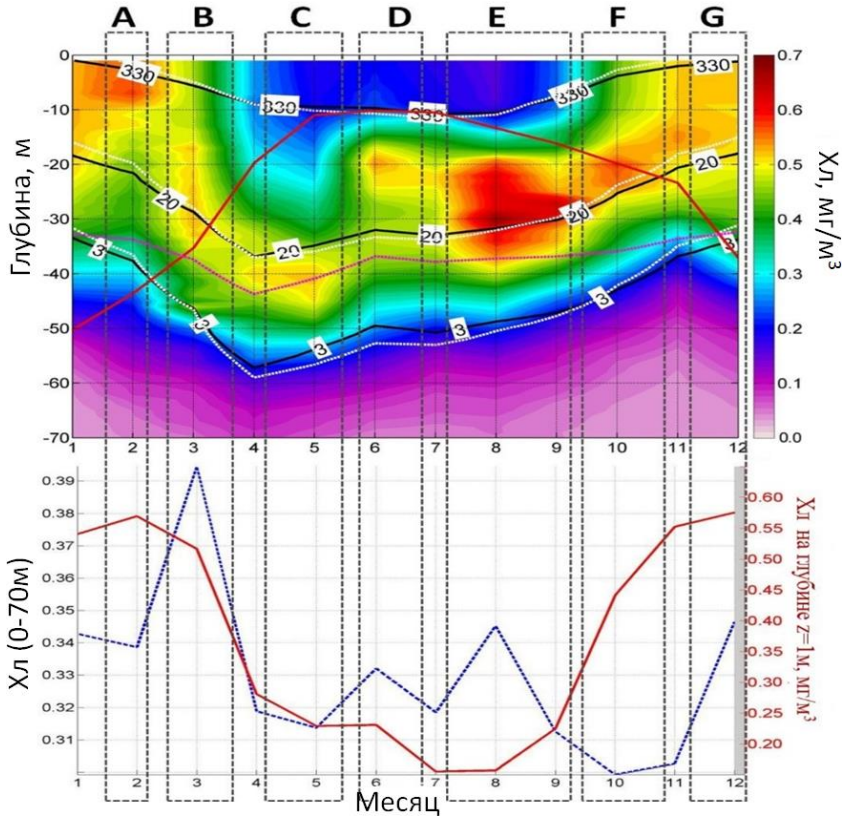

Рисунок 30 – Средняя сезонная изменчивость вертикального распределения Хл в 2014–2018 гг. по данным буев Био-Арго (черные/белые линии показывают изолинии *Ed*(3, 20 и 330 мкмоль фотонов м$^{-2}$ с$^{-1}$) и *Qs* (0,08, 0,6 и 10 моль фотонов м$^{-2}$сут$^{-1}$); красная линия показывает глубину ВКС) (а); средняя сезонная изменчивость Хл на глубине 1 м (красная линия) и интегральная в слое 0–60 м (синяя линия) (б). Вертикальные штриховые линии и буквы A–G обозначают выделенные стадии сезонного хода Хл

B. Ранневесеннее цветение в конце февраля – в марте, связанное с резким увеличением освещенности в слое формирующегося сезонного термоклина, где присутствует большое количество питательных веществ после зимней конвекции;

C. Минимум Хл и наиболее глубинное цветение в апреле–мае. Резкий минимум Хл в поверхностном слое, вызванный выеданием фитопланктона зоопланктоном и исчерпанием питательных веществ, приводит к наибольшей прозрачности вод в слое 0–45 м. При этом отсутствие эффекта самозатенения приводит к максимальному проникновению ФАР в толщу вод и возникновению наиболее глубинного цветения в слое 50–65 м в Черном море в этот период;

D. Рост Хл в очень узком слое в сезонном термоклине во второй половине мая и в июне, наблюдающийся во время и под слоем раннелетнего цветения кокколитофорид;

E. Подповерхностный максимум Хл в августе – высокие концентрации в слое 10–35 м, связанные отчасти с вертикальным вовлечением во время штормов (подраздел 4.6), кросс-шельфовой вихревой адвекцией (подраздел 3.3), реминерализацией питательных веществ;

F. Раннеосенний минимум Хл в сентябре–октябре, связанный с осенним выеданием летней популяции фитопланктона. Этот минимум интегральной Хл сопровождается его ростом в поверхностном слое, вызванный увеличением толщины ВКС и вовлечением фитопланктона из слоя подповерхностного максимума, где Хл резко уменьшается;

G. Рост Хл поздней осенью – ранней зимой (в ноябре–январе), наблюдаемый в слое ВКС (0–40 м) и вызванный вовлечением питательных веществ из слоя нутриклина под действием конвекционного и ветрового перемешивания.

В подразделе 4.5 на основе сравнительного анализа биооптических характеристик Черного моря в теплый (2016) и холодный (2017) годы показано, что взаимный эффект самозатенения и интенсивности зимней конвекции в значительной степени определяет межгодовую изменчивость характеристик подповерхностного максимума Хл в течение всего года. В холодные годы конвекция усиливает вовлечение биогенов из глубинных изопикнических слоев, что приводит к росту Хл в верхних слоях (рис. 31). Усиление продуктивности вод, и связанный с этим выброс растворенного органического вещества ухудшает условия освещенности, особенно сильно в последующий летний период, и вызывает уменьшение толщины эвфотической зоны и смещение подповерхностного максимума в верхние слои.

В теплые годы уменьшение количества вовлеченных зимой биогенов приводит к снижению Хл и росту прозрачности вод. В эти годы в летний период достаточно высокие значения ФАР наблюдаются непосредственно в верхних слоях нитроклина, не затронутых зимней конвекцией. В результате рост Хл в летний период в теплые годы наблюдается в наиболее глубинных слоях непосредственно в нутриклине. Такой эффект вызывает дополнительное увеличение концентрации биогенов в эвфотическом слое, компенсируя их слабые потоки в зимний период тёплых лет (рис. 32).

В результате полученные оценки интегральной концентрации Хл в годы с теплыми и холодными зимами оказались сопоставимы (рис. 31, в). В то же время

интенсивность зимней конвекции приводит к значительным изменениям вертикального распределения Хл. В годы с холодными зимами наблюдается узкий и резкий подповерхностный максимум Хл, в годы с теплыми – подповерхностный максимум расширяется, но значения Хл в нем ниже и распределены более равномерно (рис. 31, 32).

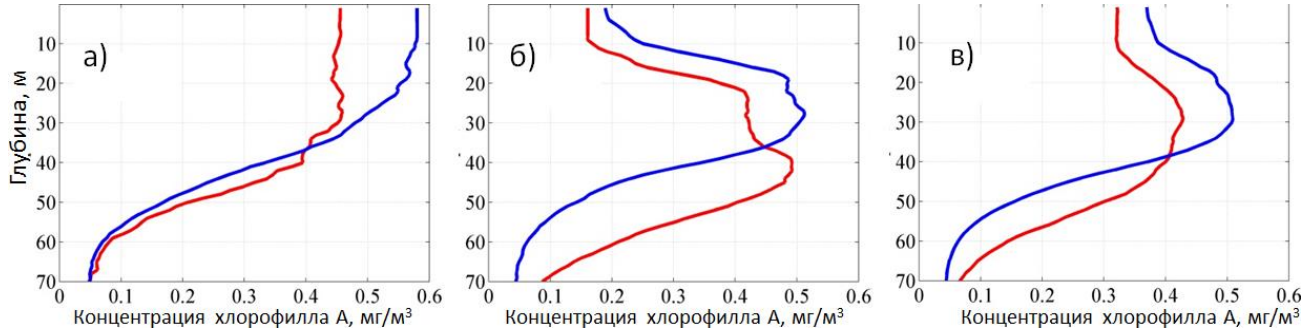

Рисунок 31 – Средний профиль Хл в теплом 2016 г. (красная линия) и холодном 2017 г. (синяя линия): зимой (январь–март) (а), летом (июнь–август) (б) и в среднем за год (в)

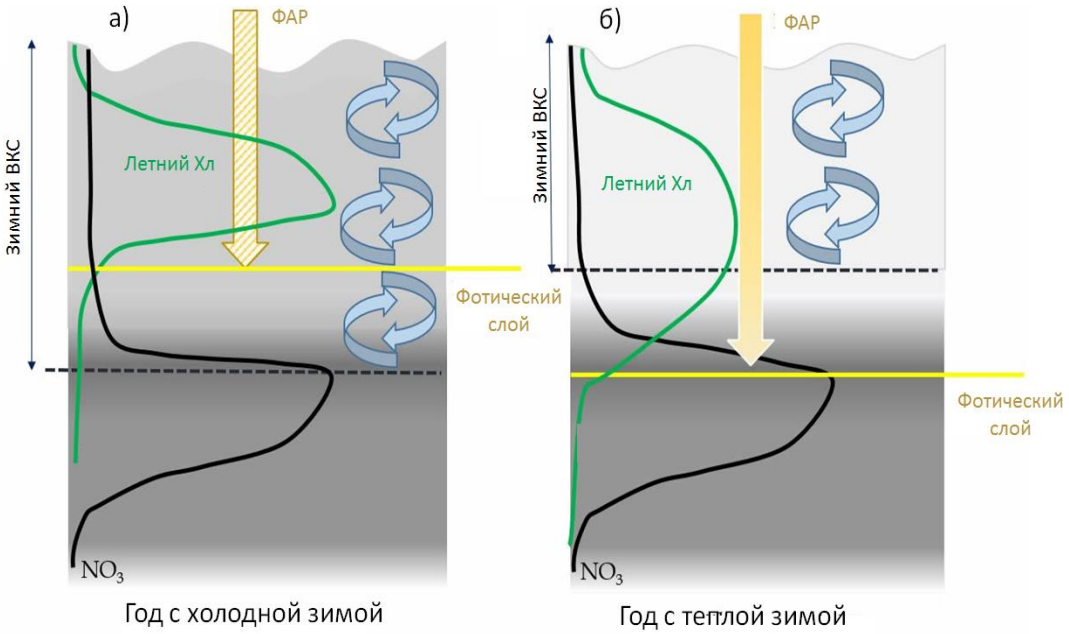

Рисунок 32 – Схема влияния конвекции и самозатенения на изменчивость вертикального распределения Хл в холодные годы (а), в теплые годы (б)

В подразделе 4.6 исследовано влияние штормового воздействия на развитие цветений фитопланктона в теплый период года. Проводится детальный анализ аномального цветения (рис. 33, а), возникшего после действия четырех последовательных интенсивных штормов в августе 2015 г., которое впоследствии наблюдалось в течение трех месяцев, с августа по ноябрь.

Цветение и его эволюция были вызваны совместным действием нескольких физических факторов:

– увеличение толщины ВКС после действия турбулентного перемешивания вызвало вовлечение фитопланктона из слоя его подповерхностного максимума и послужило первой причиной увеличения Хл на поверхности (рис. 34);

– значительное уменьшение стратификации в верхнем 100-метровом слое, причиной которого, вероятно, послужило интенсивное турбулентное перемешивание, вызванное вертикальным сдвигом сильных инерционных течений (рис. 34, в). Это привело к частичному смешению вод и вовлечению биогенных веществ из слоя подповерхностного максимума в нижние слои эвфотической зоны. Такой процесс вызвал возникновение наиболее сильного роста Хл в тонком слое (~5 м) вблизи нижней границы его подповерхностного пика, в котором измерения буев Био-Арго зафиксировали необычайно высокие значения Хл 8 мг/м^3 (рис. 34, г);

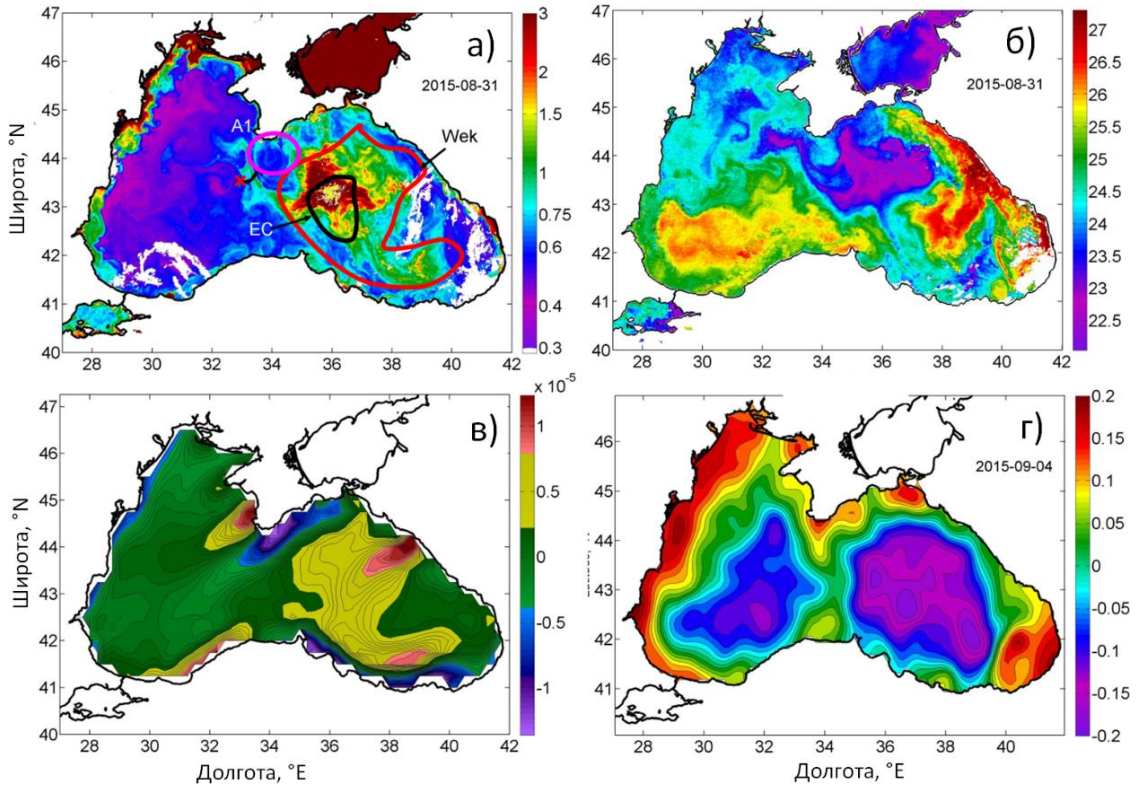

Рисунок 33 – Карты Хл за 31 августа 2015 г (а). Красной линией показано положение высоких значений среднемесячной экмановской накачки (*Wek*>3·10^{-6} м/с), черная линия указывает положение центра восточного циклонического круговорота по данным альтиметрии; фиолетовая линия отображает положение антициклона. Карта температуры поверхности (°С) от 31 августа 2015 г. (б); среднемесячная скорость экмановской накачки в августе 2015 г. (м/с) (в); распределение уровня моря по данным альтиметрии за 4 сентября 2015 г. (г)

– градиенты скорости ветра между областью шторма и зонами ветровой тени за Кавказскими горами привели к интенсивному локальному экмановскому апвеллингу и подъему глубинных вод на периферии шторма с циклоническим сдвигом (рис. 33, в). Действие перемешивания в зонах апвеллинга и связанное с ним вовлечение питательных веществ на поверхности вызвало максимальный рост Хл в этих зонах;

– экмановская накачка во время шторма привела к значительному усилению циркуляции Черного моря, формированию выраженной струи ОЧТ (рис. 35). Дивергенция вод под действием ветра и непосредственное влияние экмановской накачки на циклонической периферии шторма вызвали разрушение ряда

интенсивных синоптических антициклонов. Усиление циклонической циркуляции привело к подъему пикно– и хемоклина ближе к поверхности и возникновению зоны наибольшего цветения в центре восточного циклонического круговорота (рис. 33, а);

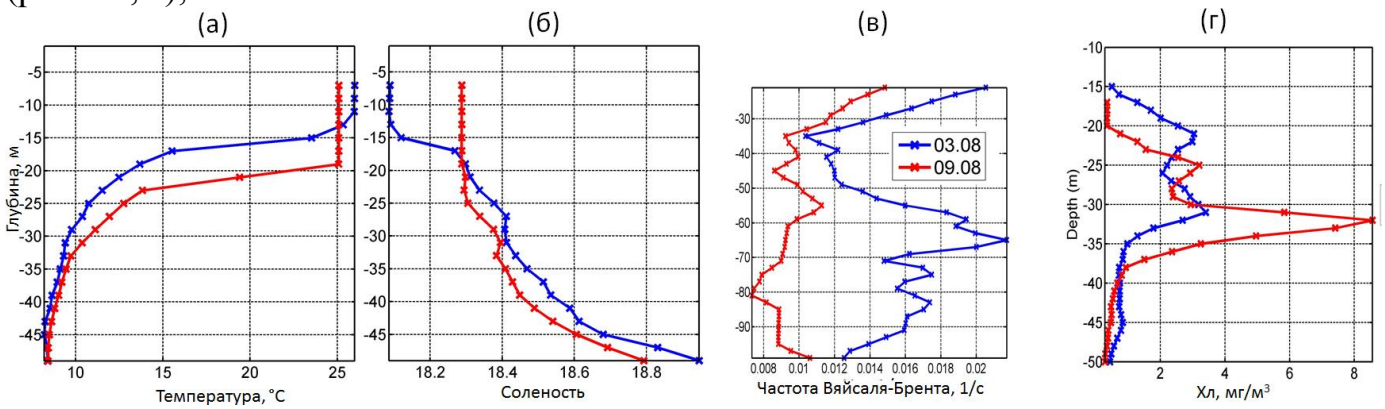

Рисунок 34 – Измерения буя Био-Арго №6901895 до и после второго шторма 3 августа (синяя линия) и 9 августа (красная линия) 2015 г. в центральной части Черного моря: (а) температура; (б) соленость; (в) частота Вяйсяля-Брента N (1/с); (г) Хл в слое 0–50 м

– наблюдающаяся до штормов динамическая топография хемоклина, определяемая синоптическими и крупномасштабными течениями, существенно повлияла на пространственную структуру цветения фитопланктона. В синоптических антициклонах, где хемоклин был опущен, рост значений Хл был подавлен, в циклонах цветение усиливалось (рис. 33, а). В то же время вихревые орбитальные движения способствовали интенсивному горизонтальному переносу Хл и биогенных элементов на значительное расстояние, вплоть до северо-западной части моря, способствуя развитию цветения в отдаленных от воздействия штормов районах.

Результаты этого подраздела показывают, что короткопериодное штормовое воздействие способно резко изменять характеристики экосистемы всего бассейна на более, чем 3 месяца, существенно влияя на сезонный цикл цветения фитопланктона в Черном море.

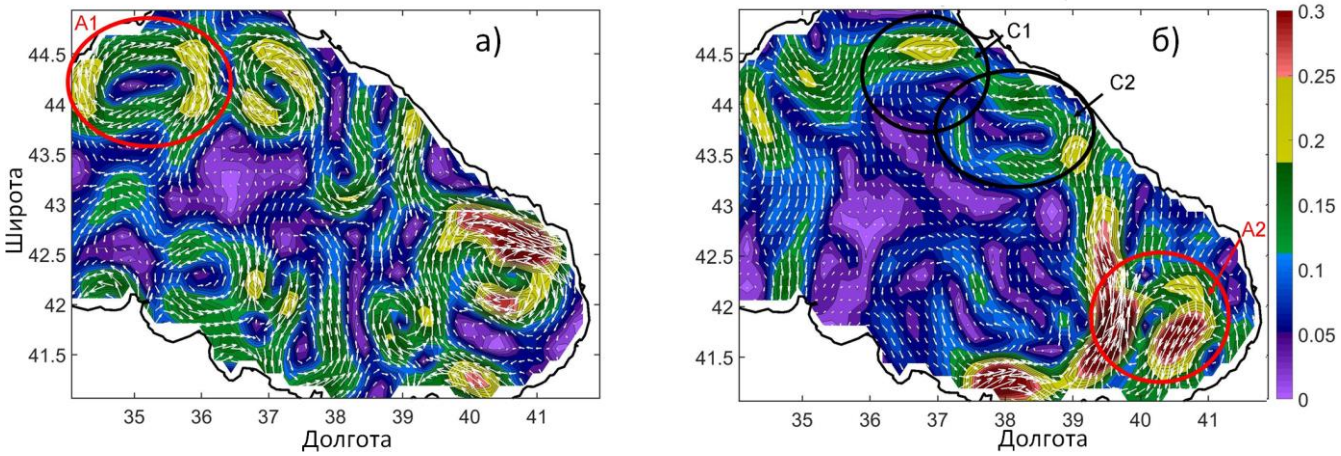

Рисунок 35 – Пространственное распределение геострофической скорости по альтиметрическим данным до шторма за 4 августа (а) и после шторма 24 августа 2015 г. (б)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамические процессы формируют потоки питательных веществ в верхний эвфотический слой, определяя изменчивость характеристик фитопланктона и оптически-активных веществ в верхнем слое вод: концентрации хлорофилла; показателя обратного рассеяния; концентрации окрашенного растворенного органического вещества. В свою очередь, эти вещества вызывают резкие изменения условия освещенности – показателя вертикального ослабления света и глубину фотической зоны. Потоки биогенных элементов и условия освещенности определяют интенсивность цветения фитопланктона – первого трофического звена морских экосистем, биопродуктивность океана и развитие высших трофических уровней.

Результаты настоящей диссертационной работы демонстрируют многообразие динамических процессов, оказывающих существенное влияние на особенности функционирования экосистемы Черного моря. К таким процессам относятся адвективный перенос шельфовых вод под влиянием вихрей и крупномасштабной динамики; запирание кросс-шельфового обмена при усилении крупномасштабной циклонической циркуляции; транспорт речных плюмов через эти барьеры дрейфовыми течениями; ветровое и конвективное перемешивание; вертикальная адвекция в вихрях; изменение толщины ВКС в зимний период, вызванное вертикальными смещениями пикноклина; локальные экмановские апвеллинги на периферии штормов; долговременное изменение халинной стратификации вод Черного моря, вызванное потеплением вод и усилением сдвига скорости.

Первоочередное влияние на эти процессы оказывает ветровое и термическое воздействие атмосферы, которые определяют характеристики горизонтального обмена под влиянием крупно– и мезомасштабной динамики вод Черного моря и интенсивность вертикального обмена под действием турбулентного перемешивания. Ведущую роль в генерации вихревой и крупномасштабной динамики вод Черного моря оказывает модуляция горизонтальных потоков плавучести интенсивностью экмановской накачки. При её усилении легкие воды скапливаются на периферии бассейна, вызывая развитие ОЧТ, а при ослаблении – эти воды смещаются в центр бассейна, вызывая локальное развитие областей антициклонической завихренности. Такой процесс является самоусиливающимся, т.к. образующиеся антициклоны приводят к интенсификации потока шельфовых вод в центральную часть моря и усилению вихрей. Подобный механизм справедлив для любого стратифицированного замкнутого или полузамкнутого моря с циклонической циркуляцией и может оказывать важное влияние на сезонную модуляцию антициклонов, например, в Каспийском или Норвежском море.

Определение взаимосвязи атмосферных, гидрофизических и гидробиологических процессов необходимо для понимания причин изменчивости состояния морских экосистем в условиях меняющегося климата. Выявление этих связей позволит в конечном итоге развить качественные физико-биохимические модели, которые дадут возможность контролировать и прогнозировать изменения в морских экосистемах, а значит эффективнее и безопаснее использовать морские

ресурсы. Полученные результаты показывают, что определение причин изменчивости и особенностей функционирования морских экосистем возможно только на основе совместных комплексных физико-биологических исследований.

Основные результаты работы кратко сформулированы ниже:

1. Впервые определена пространственно-временная изменчивость кинематических, геометрических и термохалинных характеристик вихрей Черного моря, их влияние на термохалинную структуру вод, стратификацию, транспорт тепла и соли на основе разработанных методов автоматической идентификации синоптических вихрей.

2. Показано, что вовлечение шельфовых вод в центральную часть вихря является важнейшим источником доступной потенциальной энергии для антициклонов Черного моря и тем самым вызывает их интенсификацию в поверхностных слоях. В результате происходит опускание основного халоклина и сезонного термоклина и, как следствие, разница плотности с окружающими водами значительно возрастает. Это приводит к росту доступной потенциальной энергии в вихре, которая способна поддерживать его существование достаточно длительное время уже после отрыва от источника опресненных вод. На основе численных расчетов исследована эволюция различных характеристик антициклонов при вовлечении шельфовых вод, даны оценки влияния размеров вихря и плотности шельфовых вод на их изменчивость.

3. Предложен механизм сезонной генерации антициклонов в Черном море: ослабление даунвеллинга, вызванное ослаблением экмановской накачки, приводит к оттоку опресненных вод с шельфа в центральную часть моря. Положительные горизонтальные потоки плавучести приводят к первоначальному развитию зон антициклонической завихренности. Развивающиеся антициклоны захватывают в свои орбитальные движения шельфовые опресненные воды, что приводит к росту их доступной потенциальной энергии и их дальнейшему усилению. Наиболее интенсивные вихри наблюдаются вблизи зон с максимальными градиентами плотности, связанных с источниками опресненных вод, т.е. зонами максимальных потоков плавучести. Рост экмановской дивергенции в осенний период приводит к усилению и прижатию струи ОЧТ к берегу, что вызывает разрушение антициклонов, находящихся над континентальным склоном бассейна.

4. Показано, что завихренность ветра значительно влияет на функционирование экосистемы Черного моря, определяя интенсивность горизонтального обмена на временных масштабах от синоптических до межгодовых. Рост циклонической завихренности ветра, отток вод из центра к периферии бассейна и интенсификация ОЧТ приводят к запиранию поступающих в бассейн речных вод на шельфе, уменьшению количества синоптических вихрей и горизонтальных потоков питательных веществ в центральную часть моря. Такие динамические изменения являются важной причиной межгодовой изменчивости концентрации хлорофилла А, особенно в районе континентального склона и центра северо-западного шельфа, наиболее подверженных влиянию речных вод. Периоды резкого ослабления завихренности ветра и скорости течений вызывают рост концентрации хлорофилла А на 25% на межгодовых масштабах по сравнению с периодами интенсификации.

5. Разработаны лагранжевы методы расчета распространения речных вод на основе данных альтиметрических измерений и полученных в работе оценок связи скорости ветра и дрейфовых течений, которые позволили изучить изменчивость распространения дунайских вод за более, чем 20-летний период. Проведено исследование влияния дрейфовых течений, вихревой и крупномасштабной динамики Черного моря на эту изменчивость. Показано, что определяющую роль в распространения вод Дуная играют завихренность ветра, которая формирует режим крупномасштабной и вихревой динамики, и направление ветра, которое определяет направление дрейфового переноса речных вод. Исследовано влияние распространения вод Дуная на особенности пространственной изменчивости концентрации хлорофилла А в западной части Черного моря, полученной по спутниковым данным.

6. Исследована сезонная и межгодовая изменчивость вертикального распределения основных биооптических характеристики Черного моря: концентрации хлорофилла А, показателей обратного рассеяния и показателя диффузного ослабления света, на основе анализа измерений буев Био-Арго, определена связь этих параметров с процессами вертикального обмена и изменениями условий освещенности.

7. Впервые описана вертикальная изменчивость характеристик цветения кокколитофорид в летний и зимний периоды на основе анализа измерений показателя обратного рассеяния света по данным буев Био-Арго за 2014–2019 гг. Мощность летних цветений кокколитофорид в Черном море коррелирует с плотностью верхнего квазиоднородного слоя в зимний период, которая является индикатором интенсивности вовлечения биогенных веществ из глубинных изопикнических слоев. Резкий рост солености, наблюдающийся в последнее время, вызывает увеличение плотности верхних слоев и ослабляет в них халинную стратификацию. Вероятной причиной увеличения солености является интенсификация механического перемешивания, связанная с усилением скорости ветра и течений. Сдвиговая турбулентность в весенне-осенний период года вызывает проникновение теплых вод в глубинные изопикнические слои, которое компенсируется вовлечением глубинных соленых вод из слоя халоклина. Ослабление халинной стратификации привело к чрезвычайно мощному цветению кокколитофорид, наблюдавшемуся в Черном море в 2012 и 2017 гг., которые были теплее, чем холодные 2006 или 2008 гг.

8. Впервые на основе анализа данных измерений буев Био-Арго показано, что вертикальное положение зоны высоких значений концентрации хлорофилла А во все сезоны определяется вертикальным распределением абсолютных значений ФАР. Высокие значения концентрации хлорофилла А в течение всех сезонов находились между зоной с низкой освещенностью (3 мкмоль фотонов $м^{-2}$ $с^{-1}$) и высокой освещенностью (330 мкмоль фотонов $м^{-2}$ $с^{-1}$), что в пересчете на интегральные суточные ФАР составляет 0,08 и 10 моль фотонов $м^{-2}$ $сут^{-1}$. Первая величина, предположительно, соответствует компенсационной освещенности для Черного моря, а вторая – пределу освещенности, выше которого происходит фотоингибирование/фотоадаптация фитопланктона, приводящая к уменьшению флюоресценции и клеточного содержания хлорофилла. При этом зависимость

концентрации хлорофилла А от логарифма ФАР имеет гауссовский вид, что соответствует известной кривой зависимости фотосинтеза от освещенности.

9. Установлено, что интенсивные штормы способны вызывать аномальные цветения фитопланктона в Черном море в теплый период года, в которых величины концентрации хлорофилла А по спутниковым данным могут превышать климатические значения в 5–10 раз, а продолжительность цветений может составлять более 3 месяцев. Такие цветения вызваны совместным действием четырех физических факторов: ветрового турбулентного вовлечения биогенных веществ в эвфотический слой; локального Экмановского апвеллинга на периферии шторма; диапикническим перемешиванием на верхней границе нутриклина, связанным с вертикальным сдвигом инерционных течений; интенсификацией циклонической циркуляции под действием интегральной Экмановской накачки.

10. Показано, что низкая прозрачность вод, малая толщина эвфотической зоны и, как следствие, малые глубины залегания хемоклина усиливают влияние атмосферного и гидродинамического воздействия на экосистему Черного моря. Вертикальные движения в вихревых и крупномасштабных динамических структурах определяют глубину залегания верхней границы нутриклина, стратификацию вод и характеристики перемешивания. Усиление экмановской накачки во время штормов приводит к подъему хемоклина ближе к поверхности и возникновению зон наибольшего цветения в крупномасштабных циклонических круговоротах и синоптических циклонах. В то же время в синоптических антициклонах, где хемоклин заглублен, рост концентрации хлорофилла А подавляется. Орбитальные движения в вихрях способствуют интенсивному горизонтальному переносу концентрации хлорофилла А и биогенных элементов на значительное расстояние от центра действия штормов, благоприятствуя развитию цветения в отдаленных от области воздействия штормов районах. Рост толщины ВКС вследствие опускания пикноклина в антициклонах и/или в областях даунвеллинга до величин 50–140 м в зимний период приводит к резкому уменьшению концентрации хлорофилла А из-за недостатка освещенности в этих зонах.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

1. **Kubryakov A.A.** Mean Dynamic Topography of the Black Sea, computed from altimetry, drifter measurements and hydrology data / A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny // Ocean Science. – 2011. – Vol. 7, Iss. 6. – P. 745–753. – DOI: 10.5194/os-7-745-2011.
2. Kubryakov A.A. Estimating the quality of the retrieval of the surface geostrophic circulation of the Black Sea by satellite altimetry data based on validation with drifting buoy measurements / A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2013. – Vol. 49. – P. 930–938. – DOI: 10.1134/S0001433813090089. (**Кубряков А.А.** Оценка качества восстановления поверхностной геострофической циркуляции Черного моря по данным спутниковой альтиметрии на основе сопоставления с дрифтерными измерениями / А.А. Кубряков, С.В. Станичный // Исследование Земли из космоса. – 2013. – № 3. – С. 3–12. – DOI: 10.7868/S0205961413020061).
3. **Kubryakov A.A.** The Black Sea level trends from tide gages and satellite altimetry / A.A. Kubryakov, S.V. Stanichnyi // Russian Meteorology and Hydrology. – 2013. – Vol. 38. – P. 329–333. – DOI: 10.3103/S1068373913050051. (**Кубряков А.А.** Тренды уровня Черного моря по контактным и альтиметрическим наблюдениям / А.А. Кубряков, С.В. Станичный // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 5. – С. 48–55.).
4. Zatsepin A.G. Subsatellite polygon for studying hydrophysical processes in the Black Sea shelf-slope zone / A.G. Zatsepin, A.G. Ostrovskii, V.V. Kremenetskiy, S.S. Nizov, V.B. Piotukh, V.A. Soloviev, D.A. Shvoev, A.L. Tsibul'sky, S.B. Kuklev, O.N. Kukleva, L.V. Moskalenko, O.I. Podymov, V.I. Baranov, A.A. Kondrashov, A.O. Korzh, A.A. Kubryakov, D.M. Soloviev, S.V. Stanichny // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2014. – Vol. 50. – P. 13–25. – DOI: 10.1134/S0001433813060157. (Зацепин А.Г. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря / А.Г. Зацепин, А.Г. Островский, В.В. Кременецкий, С.С. Низов, В.Б. Пиотух, В.А. Соловьев, Д.А. Швоев, А.Л. Цибульский, С.Б. Куклев, О.Н. Куклева, Л.В. Москаленко, О.И. Подымов, В.И. Баранов, А.А. Кондрашов, А.О. Корж, **А.А. Кубряков**, Д.М. Соловьев, С.В. Станичный // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50, № 1. – С. 16–29. DOI: 10.7868/S0002351513060163).
5. **Kubryakov A.A.** Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation / A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. – 2015. – Vol. 97. – P. 80–91. – DOI: 10.1016/j.dsr.2014.12.002.
6. **Kubryakov A.A.** Dynamics of Batumi anticyclone from the satellite measurements / A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny // Physical Oceanography. – 2015. – №. 2. – С. 59–68. – DOI: 10.22449/1573-160X-2015-2-59-68. (**Кубряков А.А.** Динамика Батумского антициклона по спутниковым данным / А.А. Кубряков,

С.В. Станичный // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 2. – С. 67–78. – DOI: 10.22449/0233-7584-2015-2-67-78).

7. **Kubryakov A.** Mesoscale eddies in the Black Sea from satellite altimetry data / A. Kubryakov, S. Stanichny // Oceanology. – 2015. – Vol. 55, №. 1. – P.56–67. – DOI: 10.1134/S0001437015010105. **(Кубряков А.А.** Синоптические вихри в Черном море по данным спутниковой альтиметрии / А.А. Кубряков, С.В. Станичный // Океанология. – 2015. – Т. 55, № 1. – С. 65–77. – DOI: 10.7868/S0030157415010104).
8. Zatsepin A.G. Propagation and transformation of waters of the surface desalinated layer in the Kara Sea / A.G. Zatsepin, V.V. Kremenetskiy, **A.A. Kubryakov**, S.V. Stanichny, D.M. Soloviev // Oceanology. – 2015. – Vol. 55, №4. – P. 450–460. – DOI: 10.1134/S0001437015040153. (Зацепин А.Г. Распространение и трансформация вод поверхностного опресненного слоя в Карском море / А.Г. Зацепин, В.В. Кременецкий, **А.А. Кубряков**, С.В. Станичный, Д.М. Соловьев // Океанология. – 2015. – Т. 55, № 4. – С. 502–513. – DOI: 10.7868/S0030157415040152).
9. Garmashov A.V. Comparing satellite and meteorological data on wind velocity over the Black Sea / A.V. Garmashov, **A.A. Kubryakov**, M.V. Shokurov, S.V. Stanichny, Y.N. Toloknov, A.I. Korovushkin // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2016. – Vol. 52, No 3. – P. 309–316. – DOI: 10.1134/S000143381603004X. (Гармашов А.В. Сопоставление скорости ветра над Черным морем по спутниковым и метеорологическим данным / А.В. Гармашов, **А.А. Кубряков**, М.В. Шокуров, С.В. Станичный, Ю.Н. Толокнов, А.И. Коровушкин // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 351–360. – DOI: 10.7868/S0002351516030044).
10. **Kubryakov A.A.** Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem / A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny, A.G. Zatsepin, V.V. Kremenetskiy // Journal of Marine Systems. – 2016. – Vol. 163. – P. 80–94. – DOI: 10.1016/j.jmarsys.2016.06.006.
11. **Kubryakov A.** River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data / A. Kubryakov, S. Stanichny, A. Zatsepin // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 176. – P. 177–187. – DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.020.
12. Stanichny S.V. Parameterization of surface wind-driven currents in the Black Sea using drifters, wind, and altimetry data / S.V. Stanichny, **A.A. Kubryakov**, D.M. Soloviev // Ocean Dynamics. – 2016. – Vol. 66, Iss. 1. – P. 1–10. – DOI: 10.1007/s10236-015-0901-3.
13. Matveev A.Y. Modeling of oil spreading in a problem of radar multiangle diagnostics of sea surface pollutions / A.Y. Matveev, **A.A. Kubryakov,** A.G. Boev, D.M. Bychkov, V.K. Ivanov, S.V. Stanichny, V.N. Tsymbal // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2016. – Vol. 52. – P. 940–950. – DOI: 10.1134/S0001433816090188 (Матвеев А.Я. Моделирование растекания нефти в задаче радиолокационной многоугловой диагностики загрязнений морской поверхности / А.Я. Матвеев, А.А. Кубряков, А.Г. Боев, Д.М. Бычков,

В.К. Иванов, С.В. Станичный, В.Н. Цымбал // Исследование Земли из космоса. – 2016. – №. 1-2. – С. 213-213. – DOI: 10.7868/S0205961416010097).

14. Aleskerova A.A. Propagation of Waters from the Kerch Strait in the Black Sea / A.A. Aleskerova, **A.A. Kubryakov,** Y.N. Goryachkin, S.V. Stanichny // Physical Oceanography. – 2017. – №. 6. – P. 47–57. – DOI: 10.22449/1573-160X-2017-6-47-57. (Алескерова А.А. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А.А. Алескерова, **А.А. Кубряков**, Ю.Н. Горячкин, С.В. Станичный // Морской гидрофизический журнал. – 2017. – № 6. – С. 53–64. – DOI: 10.22449/0233-7584-2017-6-53-64)
15. **Kubryakov A.A.** Quantifying the impact of basin dynamics on the regional sea level rise in the Black Sea / A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny, D.L. Volkov // Ocean Science. – 2017. – Vol. 13, Iss. 3. – P. 443–452. – DOI: 10.5194/os-13-443-2017.
16. Mikaelyan A.S. Phenology and drivers of the winter-spring phytoplankton bloom in the open Black Sea: the application of Sverdrup's hypothesis and its refinements / A.S. Mikaelyan, V.K. Chasovnikov, **A.A. Kubryakov**, S.V. Stanichny // Progress in Oceanography. – 2017. – Vol. 151. – P. 163–176. – DOI: 10.1016/j.pocean.2016.12.006.
17. **Kubryakov A.A.** Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem / A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny, A.G. Zatsepin // Journal of Marine Systems. – 2018. – Vol. 179. – P. 10–30. – DOI: 10.1016/j.jmarsys.2017.11.001.
18. **Kubryakov A.A.** Thermohaline structure, transport and evolution of the Black Sea eddies from hydrological and satellite data / A.A. Kubryakov, A.V. Bagaev, S.V. Stanichny, V.N. Belokopytov // Progress in Oceanography. – 2018. – Vol. 167. – P. 44–63. – DOI: 10.1016/j.pocean.2018.07.007.
19. **Kubryakov A.** Reconstructing large-and mesoscale dynamics in the Black Sea Region from satellite imagery and altimetry data – a comparison of two methods / A. Kubryakov, E. Plotnikov, S. Stanichny // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, Iss. 2. – 239. – DOI: 10.3390/rs10020239.
20. **Kubryakov A.A.** Three-dimensional identification of the Black Sea mesoscale eddies according to Nemo numerical model calculations / A.A. Kubryakov, A.I. Mizyuk, O.S. Puzina, M.V. Senderov // Physical Oceanography. – 2018. – Vol. 25, №. 1. – P. 18–26. – DOI: 10.22449/1573-160X-2018-1-18-26. **(Кубряков А.А.** Трехмерная идентификация синоптических вихрей Черного моря по расчетам численной модели NEMO / А.А. Кубряков, А.И. Мизюк, О.С. Пузина, М.В. Сендеров // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – № 1. – С. 20–28. – DOI: 10.22449/0233-7584-2018-1-20-28).
21. Kubryakova E.A. Impact of winter cooling on water vertical entrainment and intensity of phytoplankton bloom in the Black Sea / E.A. Kubryakova, **A.A. Kubryakov**, S.V. Stanichny // Physical oceanography. – 2018. – Vol. 25, №. 3. – С. 191–206. – DOI: 10.22449/1573-160X-2018-3-191-206. (Кубрякова Е.А. Влияние зимнего выхолаживания на вертикальное вовлечение вод и интенсивность цветения фитопланктона в Черном море / Е.А. Кубрякова, **А.А. Кубряков**, С.В. Станичный // Морской

гидрофизический журнал. – 2018. – Т. 34, № 3. – С. 206–222. – DOI: 10.22449/0233-7584-2018-3-206-222).

22. Mikaelyan A.S. Regional climate and patterns of phytoplankton annual succession in the open waters of the Black Sea / A.S. Mikaelyan, **A.A. Kubryakov**, V.A. Silkina, L.A. Pautova, V.K. Chasovnikov // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. – 2018. – Vol. 142. – P. 44–57. – DOI: 10.1016/j.dsr.2018.08.001.
23. **Kubryakov A.A.** Anomalous summer-autumn phytoplankton bloom in 2015 in the Black Sea caused by several strong wind events / A.A. Kubryakov, A.G. Zatsepin, S.V. Stanichny // Journal of Marine Systems. – 2019. – Vol. 194. – P. 11–24. – DOI: 10.1016/j.jmarsys.2019.02.004.
24. **Kubryakov A.A.** Propagation of the Azov Sea waters in the Black sea under impact of variable winds, geostrophic currents and exchange in the Kerch Strait / A.A. Kubryakov, A.A. Aleskerova, Y.N. Goryachkin, S.V. Stanichny, A.A. Latushkin, A.V. Fedirko // Progress in Oceanography. – 2019. – Vol. 176. – P. 102119. – DOI: 10.1016/j.pocean.2019.05.011.
25. **Kubryakov A.A.** Summer and winter coccolithophore blooms in the Black Sea and their impact on production of dissolved organic matter from Bio-Argo data / A.A. Kubryakov, A.S. Mikaelyan, S.V. Stanichny // Journal of Marine Systems. – 2019. – Vol. 199. – P. 103220. – DOI: 10.1016/j.jmarsys.2019.103220.
26. **Kubryakov A.** Wind velocity and wind curl variability over the Black Sea from QuikScat and ASCAT satellite measurements / A. Kubryakov, S. Stanichny, M. Shokurov, A. Garmashov // Remote sensing of environment. – 2019. – Vol. 224. – P. 236–258. – DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.034.
27. Kubryakov A.A. The Black Sea mixed layer depth variability and its relation to the basin dynamics and atmospheric forcing / **A.A. Kubryakov,** V.N. Belokopytov, A.G. Zatsepin, S.V. Stanichny, V.B. Piotukh, // Physical oceanography. – 2019. – Vol. 26, №. 5. – P. 397–413. – DOI: 10.22449/1573-160X-2019-5-397-413. (**Кубряков А.А.** Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием / А.А. Кубряков, В.Н. Белокопытов, А.Г. Зацепин, С.В. Станичный, В.Б. Пиотух, // Морской гидрофизический журнал. – 2019. – Т. 35, №. 5. – С. 449–468. – DOI: 10.22449/0233-7584-2019-5-449-468).
28. Zatsepin A.G. Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea / A. Zatsepin, **A. Kubryakov**, A. Aleskerova, D. Elkin, O. Kukleva // Ocean Dynamics. – 2019. – Vol. 69, Iss. 2. – P. 253–266. – DOI: 10.1007/s10236-018-1239-4.
29. **Kubryakov A.A.** Seasonal Stages of Chlorophyll-a Vertical Distribution and Its Relation to the Light Conditions in the Black Sea from Bio-Argo Measurements / A.A. Kubryakov, A.S. Mikaelyan, S.V. Stanichny, E.A. Kubryakova // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2020. – Vol. 125(12). – e2020JC016790. – DOI: 10.1029/2020JC016790.
30. Podymov O. Seasonal and interannual variability of vertical turbulent exchange coefficient in the Black Sea pycnocline in 2013–2016 and its relation to variability of mean kinetic energy of surface currents / O. Podymov, A. Zatsepin,

A. Kubryakov, A. Ostrovskii // Ocean Dynamics. – 2020. – Vol. 70, №. 2. – P. 199–211. – DOI: 10.1007/s10236-019-01331-*W*.

31. Mikaelyan A.S. The impact of physical processes on taxonomic composition, distribution and growth of phytoplankton in the open Black Sea / A.S. Mikaelyan, S.A. Mosharov, **A.A. Kubryakov,** L.A. Pautova, A. Fedorov, V.K. Chasovnikov // Journal of Marine Systems. – 2020. – Vol. 208. – P. 103368. – DOI: 10.1016/j.jmarsys.2020.103368.
32. **Kubryakov A.A.** Extremely strong coccolithophore blooms in the Black Sea: The decisive role of winter vertical entrainment of deep water / A.A. Kubryakov, A.S. Mikaelyan, S.V. Stanichny // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. – 2021. – 173, 103554. – DOI: 10.1016/j.dsr.2021.103554.
33. **Kubryakov A.A.** Spatial distribution and interannual variability of cyanobacteria blooms on the North-Western shelf of the Black Sea in 1985–2019 from satellite data / A.A. Kubryakov, P.N. Lishaev, A.A. Aleskerova, S.V. Stanichny, A.A. Medvedeva // Harmful Algae. – 2021. – 110, 102128. – DOI: 10.1016/j.hal.2021.102128.
34. Kubryakova E.A. Winter coccolithophore blooms in the Black Sea: Interannual variability and driving factors / E.A. Kubryakova, **A.A. Kubryakov,** A.S. Mikaelyan // Journal of Marine Systems. – 2021. – Vol. 213. – DOI: 10.1016/j.jmarsys.2020.103461.
35. Mikaelyan A.S. Effect of Mesoscale Eddy Dynamics on Bioproductivity of the Marine Ecosystems (Review) / A.S. Mikaelyan, A.G. Zatsepin, **A.A. Kubryakov** // Physical Oceanography. – 2020. – Vol. 27, No 6. – P. 590-618 – DOI: 10.22449/1573-160X-2020-6-590-618. (Микаэлян А.С. Воздействие мезомасштабной вихревой динамики на биопродуктивность морских экосистем (обзор) / А.С. Микаэлян, А.Г. Зацепин, **А.А Кубряков** // Морской гидрофизический журнал. – 2021. – Т. 36, №. 6. – С. 646–675. – DOI: 10.22449/0233-7584-2020-6-646-675).
36. Stanichny S.V. Quasi-tropical cyclone caused anomalous autumn coccolithophore bloom in the Black Sea / S.V. Stanichny, E.A. Kubryakova, **A.A. Kubryakov** // Biogeosciences. – 2021. – Vol. 18, №. 10. – P. 3173–3188. – DOI: 10.5194/bg-18-3173-2021.
37. **Kubryakov A.A.** Cross-Slope Buoyancy Fluxes Cause Intense Asymmetric Generation of Submesoscale Eddies on the Periphery of the Black Sea Mesoscale Anticyclones / A.A. Kubryakov, O.S. Puzina, A.I. Mizyuk // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2022. – Vol. 127, №. 6. – P. e2021JC018189. – DOI: 10.1029/2021JC018189.
38. Yurovsky Y.Y Submesoscale Currents from UAV: An Experiment over Small-Scale Eddies in the Coastal Black Sea / Y.Y. Yurovsky, **A.A. Kubryakov**, E.V. Plotnikov, P.N. Lishaev // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, №. 14. – P. 3364. – DOI: 10.3390/rs14143364.
39. **Kubryakov A.A.** Sinking velocity of small particles in the Black Sea: Vertical distribution and seasonal variability from continuous Bio-Argo measurements of backscattering / A.A.Kubryakov, S.V. Stanichny // Journal of Marine Systems. – 2022. – Vol. 227. – P. 103695. – DOI: 10.1016/j.jmarsys.2021.103695.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
Кубрякова Арсения Александровича

Подписано к печати 15.06.2023 г. Формат бумаги 60×84 1/16
Объем 2 п.л. Заказ № 17 Тираж 100 экз.

Напечатано в типографии СРОО «Дом Солнца»
299055
г. Севастополь, ул. Хрусталева, 143
Тел.: +7 (8692) 65-60-11
cpdi@rambler.ru