

УТВЕРЖДАЮ:

и.о. Ректора  
Федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Российский государственный  
гидрометеорологический  
университет»  
кандидат юридических наук



Бикезина Т.В.

« 03 » октября 2023 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Российский государственный  
гидрометеорологический университет»

на диссертационную работу

**Кубрякова Арсения Александровича**

«Изменчивость динамики вод Черного моря на сезонных и межгодовых  
масштабах и её влияние на морскую экосистему»,  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 1.6.17 – океанология

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» (ФГБУН ФИЦ МГИ).

**Актуальность темы работы.** Диссертационная работа посвящена исследованию причин и особенностей изменчивости характеристик крупномасштабной и вихревой динамики Черного моря, её влиянию на термохалинную структуру и биологические характеристики бассейна. Актуальность работы обусловлена существенной ролью горизонтального и вертикального обмена в формировании гидрологической структуры вод и закономерностей развития морских экосистем. Работа представляет собой комплексное исследование, которое позволяет углубить понимание механизмов взаимодействия физико-биологических процессов в морской среде. Полученные результаты могут быть использованы для развития качественных математических моделей, которые дадут возможность

контролировать и прогнозировать изменения в морских экосистемах, эффективнее и безопаснее использовать морские ресурсы.

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

Во **введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна полученных результатов, выносимые на защиту положения, практическая значимость результатов, а также представлены способы апробации работы, список публикаций по теме диссертации и личный вклад автора.

Основная цель работы формулируется как исследование изменчивости динамических процессов в Черном море, их влияния на горизонтальный и вертикальный обмен и особенности функционирования экосистемы бассейна на сезонных и межгодовых масштабах.

**В первом разделе** проводится исследование особенностей и физических причин изменчивости крупномасштабной и вихревой динамики вод Черного моря на основе спутниковых измерений и численного моделирования. Показано, что на масштабах от синоптических до межгодовых колебания интегральной кинетической энергии течений Черного моря определяются вариациями экмановской накачки. Автором демонстрируется наличие резких изменений динамической структуры Черного моря от «струйной» с преобладанием крупномасштабных течений до «вихревой» с доминированием вихрей. Анализ колебаний уровня моря показывает, что усиление завихренности ветра приводит к оттоку вод на периферию бассейна и уменьшению там водообмена. При этом во время оттока вод при ослаблении экмановской накачки происходит образования синоптических антициклонов. Для объяснения этого эффекта разработан ряд методов двумерной и трёхмерной идентификации вихрей. Эти методы позволили получить большой объем информации о пространственно-временной изменчивости и вертикальном распределении характеристик вихрей Черного моря. Автор показывает, что сезонные и межгодовые колебания количества и кинетической энергии антициклонов находятся в противофазе с кинетической энергией бассейновой циркуляции. На основе комплексного анализа данных гидрологических и спутниковых измерений, численного моделирования предложена гипотеза о причинах такой изменчивости. Продемонстрировано, что одной из важных причин интенсификации антициклонов является горизонтальное вовлечение шельфовых вод низкой плотности. Вовлечение опресненных вод в

антициклон приводит к росту горизонтальных градиентов плотности и вызывает усиление нисходящих движений, опускание пикноклина и интенсификацию вихрей. В летний период при ослаблении экмановской дивергенции, происходит релаксация полей плавучести и отток опресненных вод в центр моря. Этот процесс вызывает увеличение доступной потенциальной энергии вод и способствует усилению антициклонов, которые захватывают в свои орбитальные движения шельфовые воды, что приводит к 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, Керченскому проливу и максимуму осадков в юго-восточной части моря. Этот вывод является одним из наиболее важных результатов данной работы, касающихся изменчивости структуры динамики Черного моря

**Второй раздел** посвящен исследованию влияния горизонтального обмена на распространения шельфовых вод и изменчивость содержания хлорофилла А в Черном море. На основе дрейферных измерений предложены оригинальные методы оценки влияния дрейфовых течений на эти процессы. На основе Лагранжева подхода разработана модель, которая позволяет оценивать распространение нефтяных загрязнений и речных плюмов по спутниковым измерениям. На основе этой модели дано детальное описание межгодовой изменчивости ареалов распространения дунайских вод в летний период 1992–2015 гг. и их связи с крупномасштабными, вихревыми и дрейфовыми течениями в Черном море. Продемонстрировано существенное влияние этих процессов на изменчивость поверхностной концентрации хлорофилла А в западной части Черного моря. Показано, что средняя поверхностная концентрация хлорофилла А в глубоководной части бассейна на масштабах более года находится в противофазе со средней кинетической энергией Черного моря. При этом усиление течений приводит к наиболее резкому уменьшению концентрации хлорофилла А на континентальном склоне, а также в центре и на востоке северо-западного шельфа, т.е. в зоне действия синоптических вихрей. Такой эффект объясняется увеличением мощности динамического барьера между шельфом и глубоководной частью моря, снижением количества синоптических антициклонов и связанного с ним горизонтального транспорта биогенных элементов в годы с интенсивной циркуляцией.

**В третьем разделе** исследуются особенности влияния динамических процессов на изменчивость термохалинной структуры и стратификации вод Черного моря. Рассмотрено три крупные задачи. В подразделе 3.1

исследуется долговременная изменчивость температуры и солёности вод Черного моря в изопикнических координатах. Показано, что осолонение верхних слоев Черного моря связано с усилением вертикального обмена под действием сдвигового перемешивания в теплый период времени года. Этот процесс приводит к вовлечению теплых вод в нижние изопикнические слои, которое сопровождается компенсирующим ростом их солёности. Долговременная интенсификация ветрового воздействия и течений Черного моря вызвала резкое осолонение его верхнего слоя после 2014 г. и ослабление его халинной стратификации. В подразделе 3.2 на основе комбинирования спутниковых и гидрологических измерений проводится подробное исследование влияния синоптических вихрей на термохалинную структуру вод. На основе разработанных методов исследовано вертикальное распределение аномалии температуры и солёности в циклонах и антициклонах Черного моря, её связь с интенсивностью вихрей и сезонная изменчивость. Предложена параметризация связи между орбитальной скоростью вихря, положением пикноклина и средними аномалиями солёности и температуры, которые позволили рассчитать пространственное распределение тепло- и солесодержания в вихрях различного знака. Даны оценки влияния вихрей на особенности стратификации. В подразделе 3.3 исследуется сезонная и межгодовая изменчивость верхнего квазиоднородного слоя, определена её связь со скоростью ветра и проанализированы особенности динамики бассейна. Представленные в этом разделе результаты дают количественные оценки влияния ряда динамических процессов на вертикальную структуру вод Черного моря.

**В четвертом разделе** исследуется совместное влияние вертикальной адвекции, перемешивания и освещенности на изменчивость распределения основных биооптических характеристик (концентрации хлорофилла А, показателя обратного рассеяния света, коэффициента ослабления света) Черного моря на различных временных масштабах. Для этой цели используется большой массив современных измерений буев Био-Арго, который позволил определить и исследовать изменчивость вертикального распределения этих характеристик на синоптических масштабах за многолетний период. Показано, что аномально сильные летние цветения кокколитофорид в Черном море связаны с усилением вертикального вовлечения питательных веществ из глубинных изопикнических слоев в предшествующий зимний период. Этот процесс модулируется ослаблением халинной стратификации, связанным с интенсификацией динамических процессов. Интенсивные цветения кокколитофорид значительно влияют на условия освещенности, поскольку их окончание сопровождается выбросом

большого количества растворенного органического вещества. Показано, что условия освещенности имеют определяющее значение для формирования вертикального распределения концентрации хлорофилла А, определяя толщину и глубину ее подповерхностного максимума. При этом, их изменения способны частично компенсировать влияние вертикального вовлечения биогенных элементов на концентрацию хлорофилла А из-за эффекта самозатенения. Проведен детальный анализ изменчивости вертикального распределения концентрации хлорофилла А на масштабах от синоптических до межгодовых. Продемонстрировано наличие резких колебаний этого параметра, которые связаны с рядом физических процессов: зимней конвекцией; изменения толщины верхнего квазиоднородного слоя и условий освещенности в районах даунвеллинга; штормовым воздействием, которое вызывает перемешивание и усиливает вертикальную адвекцию биогенных элементов в районах циклонической завихренности вод.

**Новизна исследования и полученных результатов.** Научную новизну составляют следующие положения, выносимые на защиту:

– 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.

– 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.

– 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.

– 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.

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

Помимо этого, новизной обладают следующие результаты:

– 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;

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

– оценки сезонной и межгодовой изменчивости вертикального распределения основных биооптических характеристик Черного моря: концентрации хлорофилла А, показателя обратного рассеяния, фотосинтетической 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;

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

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

**Обоснованность и достоверность результатов.** 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.

**Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.** Значимость диссертационной работы заключается в описании новых механизмов формирования и изменчивости характеристик синоптических вихрей, взаимодействия крупномасштабной и вихревой динамики вод, влияния динамики на термохалинную структуру вод и обмен веществом в Черном море. Кроме этого, полученные результаты расширяют имеющиеся представления о влиянии различных физических процессов на изменчивость динамики фитопланктонных сообществ и, связанных с ними биооптических характеристик. Полученные результаты необходимы для понимания причин современных изменений гидрологической структуры и продукционных характеристик 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).

**Замечания по диссертации:**

1. Выполненное в разделе 1 исследование основано на данных об уровне море, полученных по измерениям спутниковых альтиметров. Эти данные имеют ряд недостатков, связанные, в частности, с процедурой интерполяции вдольтрековых измерений. Необходимо было бы провести оценки точности скоростей, определенных по альтиметрическим данным, а также обсудить влияние вышеперечисленных эффектов на полученные результаты.
2. В подразделе 2.1 проведена параметризация дрейфовой компоненты течений и получен постоянный амплитудный коэффициент дрейфовой компоненты скорости. Вместе с тем, величины дрейфовой компоненты скорости могут сильно зависеть от стратификации, и, в частности, отличаться при зимних и летних условиях, что требует пояснения.

3. В разделе 2.2 рассматриваются результаты расчетов динамики нефтяных загрязнений по модели FOTS и на основе спутниковых данных. Однако, отсутствует связь между изменчивостью содержания хлорофилла А и решением задачи по распространению нефтяных загрязнений. Таким образом, подразделы 2.2.20-2.2.4 представляют отдельную задачу, не связанную с изменчивостью концентрации хлорофилла А. Включение данного раздела автором не аргументировано.

4. В подразделе 2.3 на основе спутниковых измерений показано, что вихри могут существенно влиять на перенос хлорофилла А в зону континентального склона. В то же время известно, что спутниковые данные на шельфе могут содержать значимые ошибки из-за влияния таких факторов, как содержание растворенного и взвешенного органического вещества в прибрежных водах. В работе не обсуждается, как эти неточности могут повлиять на результаты работы.

5. В подразделе 3.3 автор указывает на существенное влияние крупно- и мезомасштабной динамики на толщину верхнего квазиоднородного слоя в зимний период. Вместе с тем, на изменчивость ВКС также могут оказывать существенное влияние другие эффекты – фронтальные зоны, субмезомасштабные движения и т.д. Эти эффекты вносят свой вклад в изменение толщины ВКС и в летний период. Однако их роль в данной работе не обсуждается.

6. В разделе 4 большое внимание уделяется влиянию освещенности на изменение концентрации хлорофилла А. Однако из текста не совсем ясно, как это исследование связано с изучением взаимосвязи динамики и биопродуктивности вод Черного моря.

Также в работе встречается несогласованность падежей и немногочисленные грамматические ошибки (стр.328, 2 абзац, 6 строка). На некоторых рисунках подписи выполнены на английском языке.

Отмеченные недостатки не умаляют полученные в диссертации результаты и выводы и не влияют на общую положительную оценку работы.

**Заключение.** Диссертационная работа А.А. Кубрякова является законченной научно-квалификационной работой, в которой выполнены исследования, имеющие важное научное и прикладное значение для исследования динамических процессов в Черном море и их воздействия на продукционные характеристики морской экосистемы. На основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области региональной океанологии.

В диссертации имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя. Результаты работы в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК Российской Федерации.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.17 – океанология в части пункта 3 «Динамические процессы (волны, вихри, течения, пограничные слои) в океане» и пункта 6 «Биологические процессы в океане, их связь с абиотическими факторами среды и хозяйственной деятельностью человека, биопродуктивность районов Мирового океана».

Автореферат диссертации в достаточной мере отражает ее содержание и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 с изменениями, утвержденными Постановлением Правительства Российской Федерации от 20.03.2021 г. №426.

Диссертация по содержанию и оформлению удовлетворяет всем требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Кубряков Арсений Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв подготовлен и обсужден заседании Ученого Совета института гидрологии и океанологии от 26.09.2023 года, протокол №2.

Директор института гидрологии и океанологии,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент

 Ерёмина Татьяна Рэмовна

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

Адрес: 192007, г.Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д.79.

Телефон: (812) 633-01-82.

E-mail: rshu@rshu.ru

Сайт <https://www.rshu.ru/>

Подпись Т.Р. Ереминой заверяю:

Начальник управления кадров федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

