

На правах рукописи

Алескерова Анна Адиловна

**СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ
ВЛИЯНИЕ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА
У БЕРЕГОВ КРЫМА**

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Севастополь – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»

Научный руководитель: **Станичный Сергей Владимирович**
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Белоненко Татьяна Васильевна**
доктор географических наук,
Федеральное государственное бюджетное образова-
тельное учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский государственный университет»,
профессор кафедры океанологии

Лаврова Ольга Юрьевна
кандидат физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт космических исследований Россий-
ской академии наук, ведущий научный сотрудник и
руководитель лабораторией аэрокосмической радио-
локации

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии
им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Защита состоится «**20**» **мая 2022** года в 11 ч. 00 мин. на заседании
Диссертационного совета 24.1.229.01 при Федеральном государственном бюджет-
ном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофи-
зический институт РАН» по адресу: **299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Морской
гидрофизический институт РАН» и на сайте Института [http://mhi-
ras.ru/news/thesis_defense_202201210910.html](http://mhi-ras.ru/news/thesis_defense_202201210910.html)

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.01
кандидат географических наук

Харитоновна Людмила Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Субмезомасштабные процессы в прибрежной зоне возникают в результате неоднородного воздействия ветра, сложной конфигурации береговой линии, наличия речных стоков и апвеллингов. Данные процессы способствуют вертикальному и горизонтальному обмену, что влияет на распространение загрязняющих взвешенных веществ, а также приводит к выносу биогенных элементов из прибрежной зоны в центральную часть моря.

Субмезомасштабные вихри характеризуются малыми пространственными размерами (0,1 – 10 км), и высокой временной изменчивостью (от часов до нескольких суток) [McWilliams, 2016]. Благодаря развитию средств дистанционного зондирования стало возможно их детальное изучение.

Рост хозяйственной и рекреационной нагрузки на прибрежные акватории обосновывает актуальность детального изучения субмезомасштабной динамики вод в этих районах, а также исследование факторов ее определяющих.

В настоящей работе впервые на основе архива спутниковых данных среднего и высокого разрешения за более чем 30-летний период подробно исследована субмезомасштабная динамика вод у берегов Крыма, ее связь с атмосферным воздействием и влияние на перенос взвешенного вещества из Азовского моря.

Исследование динамических процессов, которые имеют достаточно малые пространственные масштабы (до нескольких километров) и непродолжительное время существования, по контактными данным или модельным расчетам является сложной задачей. В работах [Zatsepin и др., 2011, Лаврова и др., 2012] были получены характеристики субмезомасштабных вихрей в Черном море по контактными измерениям, в частности, субмезомасштабные вихри в районе Геленджика изучались на основе комплексных гидрологических измерений. Появление новых оптических средств дистанционного зондирования с высоким разрешением дало возможность регулярно наблюдать и исследовать субмезомасштабные процессы, определять их характеристики и выявлять возможные механизмы образования. В частности, субмезомасштабные вихри исследовались в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря по спутниковым радиолокационным и оптическим измерениям [Lavrova et al., 2006, 2012; Костяной и др., 2010]. В приведенных работах представлены отдельные примеры по данным радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА). Российские исследователи активно ведут изучение субмезомасштабной вихревой динамики по спутниковым данным в Черном, Балтийском, Белом, Каспийском морях [Zatsepin et al., 2011, 2019; Gurova, Chubarenko, 2012; Karimova et al., 2012; Атаджанова и др, 2017].

Цель работы – исследовать субмезомасштабные процессы в акватории у берегов Крыма и определить их влияние на пространственно-временное распределение температуры и оптических характеристик морской поверхности и на перенос взвешенного вещества.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие научные задачи:

1. Разработать алгоритм восстановления температуры морской поверхности с высоким пространственным разрешением на основе спутниковых данных сканера TIRS Landsat-8.

2. Исследовать особенности распространения взвешенного вещества под влиянием штормовых ветров у западного побережья Крыма по оптическим данным высокого разрешения.

3. На основе карт оптических характеристик и температуры проанализировать распространение азовоморских вод в Черном море. Изучить влияние ветра, течений и различных динамических факторов на пространственное распределение азовоморских вод.

4. Изучить характеристики и механизмы образования субмезомасштабных вихрей у берегов Крыма. Определить характерные районы их возникновения и оценить влияние вихрей на перенос взвешенного вещества в различных участках акватории.

Научная новизна результатов проведенных исследований. Впервые для Черноморского региона на основе сопоставления данных со спутника Landsat-8 с данными спектрорадиометра MODIS адаптирован двухканальный алгоритм восстановления температуры по измерениям спутника Landsat-8 (TIRS-Thermal InfraRed Sensor). Полученный алгоритм позволяет восстанавливать температуру поверхности моря с разрешением около 100 метров, что дает возможность анализировать пространственную структуру поля температуры на пространственных масштабах 0,1 – 1 км.

Впервые определено пространственное распределение взвешенного вещества в водах у берегов Крыма, возникающее под влиянием различных штормовых ветров. Выявлены основные районы возникновения наиболее высоких значений концентрации на основе анализа массива спутниковых данных.

Впервые на основе архива спутниковых данных за более чем 30-летний период исследованы пространственные и временные характеристики распространения азовоморских вод в акватории Черного моря. Получены зависимости интенсивности их распространения от силы и направления ветра, синоптической и крупномасштабной геострофической циркуляции и водообмена через Керченский пролив.

Впервые проведена типизация субмезомасштабных процессов, характерных для различных прибрежных районов Крыма. Определены их типичные размеры, районы возникновения и оценено их влияние на перенос взвешенного вещества. Продемонстрированы описанные ранее возможные причины образования субмезомасштабных процессов у берегов Крыма.

Положения, выносимые на защиту:

1. Двухканальный алгоритм восстановления температуры по измерениям Landsat-8 с разрешением около 100 метров, адаптированный для Черноморского региона.

2. Классификация поля пространственного распределения распространения взвешенного вещества под влиянием различных штормовых ветров в прибрежной зоне Западного Крыма.

3. Количественные и качественные оценки пространственных и временных характеристик распространения азовоморских вод в зависимости от силы и направления ветра, мезомасштабной и крупномасштабной геострофической циркуляции,

водообмена через Керченский пролив на основе архива спутниковых данных за более чем 30-летний период.

4. Типизация характерных для различных районов побережья Крыма субмезомасштабных процессов, определение их характерных размеров, мест возникновения и влияния на перенос взвешенного вещества.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в выявлении физико-географических закономерностей генерации субмезомасштабных вихрей у берегов Крыма. Уточнение представлений об их влиянии на распределение взвешенного вещества может быть использовано для понимания причин и процессов, ответственных за распространение примесей различной природы в прибрежной зоне.

Практическая значимость работы состоит в разработке и апробации регионального алгоритма определения температуры поверхности Черного моря по данным сканера TIRS с высоким пространственным разрешением; типизации проявления субмезомасштабных процессов в различных зонах береговой линии Крыма и исследовании их роли в переносе взвешенного вещества и сопутствующих загрязнений для оценки ассимиляционных характеристик шельфовой зоны. Результаты могут быть применены при прогнозировании распространения загрязнений в прибрежной зоне.

Методология и методы исследования. Основным методическим подходом диссертационного исследования являлся комплексный анализ разнородных океанографических и гидрометеорологических данных: оптических и ИК-радиометров с различными пространственными разрешениями, скаттерометров, спутниковых измерений альтиметров; гидрологических измерений на станциях.

В процессе исследования использовались различные подходы, основанные на статистическом (композитном) анализе больших объемов данных, детальном анализе отдельных событий, а также других традиционных методах океанографии.

Для определения концентрации взвешенного вещества (TSM – total concentration of suspended matter) применялся региональный алгоритм, основанный на комбинации спектральной яркости на различных длинах волн по данным сканеров MODIS-Aqua [Кременчуцкий и др., 2014].

Для получения информации о полях скорости ветра на высоте 10 метров использовались данные реанализа Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA) и Era-Interim [Dee et al., 2011]. Также использовались данные о скорости ветра, полученные по измерениям спутникового скаттерометра QuikSCAT с 1999 по 2009 гг., которые позволяют получить информацию о ветровом режиме непосредственно над морем.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обусловлена проведенным статистическим анализом большого объема данных. Были использованы данные в видимом диапазоне со спутников Landsat за более чем 30-летний период (с 1983 по 2020 гг., всего 1500 сцен), MODIS с 2000 г. и Sentinel-2 с 2015 г. Проведено сопоставление одномоментных спутниковых данных с различным пространственным разрешением. Кроме оптических спутниковых данных, использовались данные о скорости ветра, полученные по измерениям спутникового скаттерометра QuikSCAT, а также данные атмосферных реанализов Era-Interim и

Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA), которые с достаточной точностью, подтвержденной многими исследованиями, описывают атмосферное воздействие над Черным морем.

Достоверность и новизна научных результатов подтверждаются публикациями в ведущих профильных рецензируемых журналах.

Основные результаты диссертации представлялись на семинарах отдела дистанционных методов исследования и отделения оперативной океанографии ФГБУН ФИЦ МГИ, а также на следующих российских и международных конференциях, семинарах и школах: «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала Юга России» (пос. Кацивели, 2014 г.); Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2014 г., 2015 г., 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г., 2020 г.); Шестая Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (г. Таруса, 2015 г.); XII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (г. Москва, 2015 г.); «Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова» (г. Севастополь, 2015 г.); Молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования» (г. Севастополь, 2016 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: наука, безопасность, ресурсы» (г. Севастополь, 2017 г.); II Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (г. Москва, 2017 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: методы, средства и результаты исследований» (г. Севастополь, 2018 г.); Десятая международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (г. Таруса, 2019 г.); IV Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (г. Севастополь, 2019 г.).

Личный вклад автора. Автором проведена обработка и анализ спутниковых данных; принималось участие в адаптации регионального двухканального алгоритма восстановления температуры по измерениям спутника Landsat-8 и выполнен анализ его точности; определялись характеристики субмезомасштабных процессов и принималось участие в выявлении возможных причин их возникновения в зависимости от направления и скорости ветра, а также от конфигурации береговой линии. Выделены различные типы распространения азовоморских вод по акватории Черного моря под влиянием ветра. Совместно с соавторами проведен анализ пространственного распределения взвешенного вещества при штормовых ветрах у западного берега Крыма.

Публикации по теме диссертации. Результаты диссертации опубликованы в соавторстве в 20 научных работах, из них 9 статей в рецензируемых журналах, 1 статья в рецензируемом сборнике научных трудов и 10 тезисов докладов на Всероссийских конференциях. Требованиям ВАК при Минобрнауки Российской Федерации удовлетворяют 7 работ в рецензируемых российских научных изданиях. В их числе 6 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка сокращений и обозначений, списка использованных источников. Объем работы составляет 154 страницы. Текст исследования иллюстрирован 44 рисунками. Библиографический список включает в себя 220 наименований, в том числе 121 на английском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы, включающая актуальность и степень разработанности темы, цель исследования, поставленные задачи, новизну работы, ее практическую значимость, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

В **первом разделе** представлен обзор исследований субмезомасштабных процессов, которые были выполнены до настоящего времени. В *подразделе 1.1* приведен литературный обзор исследований субмезомасштабных вихрей, даны их характеристики. Отмечено, что субмезомасштабные вихри являются промежуточным звеном между мезомасштабной циркуляцией океана и мелкомасштабными турбулентными процессами, отвечающими за перемешивание в океане. Выполнен обзор исследований субмезомасштабных вихрей в северных морях, Каспийском и Балтийском морях. Субмезомасштабные процессы имеют малые масштабы и короткое время жизни, поэтому их изучение с помощью контактных данных представляет собой сложную задачу. Изучение пространственной и временной изменчивости таких процессов стало возможным только с появлением спутниковых данных с высоким пространственным разрешением. Это дало возможность определять характеристики субмезомасштабных процессов и выделить районы наиболее частых их проявлений. *Подраздел 1.2* посвящен исследованию субмезомасштабных процессов в Черном море по спутниковым измерениям. Мониторинг позволил выявить основные районы наиболее частых проявлений мелкомасштабных вихрей и вихревых диполей на радиолокационных снимках [Лаврова и др. 2011]. Показано, что субмезомасштабные процессы в Черном море изучались также по контактными и модельным расчетам [Зацепин и др., 2013; Дымова, 2016, 2017]. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время недостаточно исследованы как пространственно-временные характеристики субмезомасштабных процессов Черного моря, особенно в районе шельфа Крымского полуострова, так и их роль в перераспределении взвешенных веществ.

Второй раздел посвящен определению температуры поверхности Черного моря по спутниковым данным высокого разрешения. В данном разделе описан двухканальный алгоритм восстановления температуры по измерениям Landsat-8 (TIRS) на основе использования калиброванных измерений температуры поверхности моря (ТПМ) спутника MODIS-Aqua. Информация о температуре поверхности на малых пространственных масштабах особенно актуальна для решения многих прикладных задач региональной океанологии. В *подразделе 2.1* приводится обоснование двухканального метода восстановления температуры

поверхности моря. Сущность двухканального метода определения ТПМ состоит в том, что излучательные характеристики атмосферы в двух каналах различны, а характеристики излучения поверхности моря одинаковы [McClain et al., 1985; Schluessel et al., 1990; Brown et al., 1999]. Сигнал, принимаемый спутником, является суммой сигнала от поверхности моря (собственно ТПМ) и от атмосферы (связанный с пропусканием атмосферы). Двухканальный метод лежит в основе современных методов восстановления температуры по измерениям приборов MODIS и AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) [McClain et al., 1985; Brown et al., 1999]. В *подразделе 2.2* представлен алгоритм восстановления ТМП по данным спутника Landsat-8. Для определения температуры по измерениям Landsat-8 (Т) предлагается использовать формулу:

$$T = T_{10} + a \cdot (T_{10} - T_{11}) + b, \quad (1)$$

где T_{10} – яркостная температура по измерениям Landsat-8 по ИК данным в 10-м канале, °К; T_{11} – яркостная температура по измерениям Landsat-8 по ИК данным в 11-м канале, °К; а и b – безразмерные коэффициенты.

Для определения коэффициентов а и b в качестве температуры Т используются калиброванные данные о температуре, полученные по измерениям зонда MODIS. Для разработки алгоритма восстановления температуры использовались данные сенсора TIRS, установленного на спутнике Landsat-8 (TIRS), за период с июня 2013 г. по август 2014 г. Снимки спутника Landsat-8 подбирались по двум критериям: отсутствие облачности и большие перепады яркостной температуры на снимке. Для определения констант а и b были подобраны квазисинхронные снимки MODIS-Aqua и Landsat-8. Всего было выбрано 12 снимков. Конечная формула для расчета температуры по данным Landsat-8 (T_m) имеет вид:

$$T_m = A \cdot T_{10} + B \cdot T_{11} + C = 1,88 \cdot T_{10} - 0,8266 \cdot T_{11} - 0,866 \quad (2)$$

где А, В, С – безразмерные коэффициенты.

Диаграмма рассеяния между температурой, определенной по данным MODIS, и температурой, восстановленной по данным Landsat-8 (TIRS), изображена на Рисунке 1. Видно, что эти величины хорошо коррелируют между собой. Для этих двух рядов были рассчитаны статистические характеристики: коэффициент корреляции, который составил 0,99, и среднеквадратичное отклонение, равное 0,58°С.

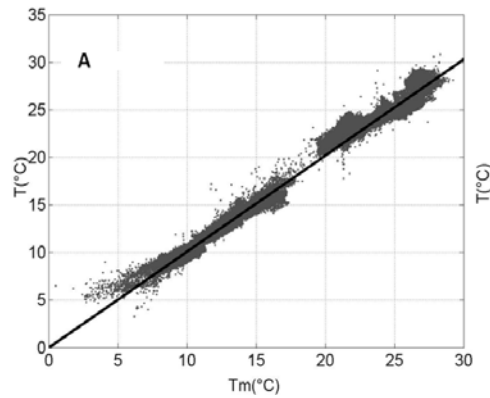


Рисунок 1 – Диаграмма рассеяния между температурами по данным MODIS (T) и по данным Landsat-8 (TIRS) (Tm) [Aleskerova et al., 2016]

В *подразделе 2.3* рассмотрены причины различия температуры по данным MODIS и температуры, восстановленной по данным Landsat-8 (TIRS). В работе показано, что температура по данным спектрорадиометра MODIS в летний период выше, чем температура, восстановленная по данным Landsat. Это связано с различием во времени пролета спутников. Спутник MODIS-Aqua пролетает над Черным морем примерно в 11 часов UTC, а Landsat в 8 часов UTC, что соответствует 14 и 11 часам местного времени. Таким образом, MODIS измеряет температуру верхнего слоя в период максимального дневного прогрева. Величины дневного прогрева в Черном море, оцененные в работе [Акимов и др., 2014] по данным прибора SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager), могут достигать 1 – 4°C. Вторая причина возникающих ошибок связана с наличием специфических полос в данных Landsat-8 (TIRS). Одно изображение Landsat-8 (TIRS) может состоять из трех зон, в которых яркостная температура отличается друг от друга на несколько десятых градуса. Эти ошибки, вероятно, связаны с инструментальными погрешностями прибора. При этом эти полосы не всегда присутствуют на изображениях. В *подразделе 2.4* представлены примеры восстановления температуры Черного моря по спутниковым данным с высоким разрешением.

В **третьем разделе** проводится исследование распространение взвешенного вещества (ВВ) под влиянием штормовых ветров у Западного побережья Крыма.

В *подразделе 3.1* описывается ветровой режим в районе Западного Крыма. Анализ показал, что суммарная доля ветров южного румба, которые являлись наиболее волноопасными для Западного побережья Крыма в 1999 – 2009 гг., составляла 30%. Примерно такая же доля отмечена и для северо-восточных ветров. Реже фиксировались западные (12%) и восточные (11%) ветры. Наиболее часто сильные северо-восточные ветры наблюдаются в октябре и декабре, январе. В марте и ноябре отмечается увеличение повторяемости сильных юго-восточных ветров. Реже всего в данном районе встречаются сильные северо-западные ветра. В теплый период года наиболее часты южные, юго-восточные, восточные и западные ветры. Сильные ветры северо-восточного направления преобладают с августа по апрель. Под сильными ветрами здесь и ниже подразумеваются ветры со скоростью 8 м/с и более.

В *подразделе 3.2* дается описание источников взвешенного вещества у Западного берега Крыма. По данным зонда MODIS с использованием регионального алгоритма [Кременчуцкий и др., 2014] рассчитано среднемноголетнее пространственное распределение концентрации ВВ в акватории северной части Черного моря за период 2003 – 2015 гг. В северной части Черного моря выделяются три наиболее значительные зоны с повышенными значениями концентрации ВВ. Это районы мелководных Каркинитского и Каламитского заливов, а также Керченского пролива с акваториями, прилегающими к Керченскому и Таманскому полуостровам. Типичные среднемноголетние значения концентрации ВВ здесь составляют 5 – 10 мг/л, причем наибольшие значения отмечаются у берега. Основным источником повышенных концентраций ВВ в прибрежной зоне российского сектора Черного моря связан с разрушением глинистых клифов в Каркинитском и Каламитском заливах и Керченском проливе. В Каламитском заливе наибольшее поступление ВВ в море дают участки берега, где пляжи или отсутствуют, или их ширина небольшая. В этом случае энергия волнения не гасится на пляже, а расходуется на разрушение глинистых клифов. На остальных участках с глинистым клифом и относительно широким пляжем основной механизм поступления ВВ – отмывание грунта, оказавшегося на пляже в результате обвальных и оползневых процессов. Вторым по значимости источником является разрушение активного бенча – глинистой, конгломератовой или песчаной поверхности прибрежного дна. Подчиненное значение имеет поступление ВВ из рек и временных водотоков, в первом приближении оно меньше на порядок, чем поступление из-за разрушения клифов. Наконец, определенное количество вещества поступает с песчаных пляжей в море в период преобладающих в холодный период сильных ветров северных направлений (эоловые процессы).

В *подразделе 3.3* приводится среднемноголетнее распределение ВВ. На среднемноголетнее распределение большое влияние оказывают эпизодические события – штормы, которые резко увеличивают концентрацию ВВ. Пространственное распределение концентрации ВВ при южных и юго-западных ветрах достаточно хорошо совпадает со средней картой концентрации ВВ. Это направление наиболее эффективно для поступления в море и поддержания высоких концентраций ВВ, что связано с максимальной для Каламитского залива длиной разгона волн (от 350 до 550 км). Кроме этого, повторяемость штормов данного направления в исследуемый период была максимальной. Концентрации ВВ очень высоки и достигают 200 мг/л, что и дает основной вклад в среднее распределение. Распределение концентрации ВВ для северо-восточных ветров показывает, что основная область взмучивания не выходит за пределы Каламитского залива. Величины концентрации ВВ по сравнению с предыдущим случаем более чем на порядок меньшие (1 – 5 мг/л). Видимо, основным источником ВВ – это взмучивание водной толщи в восточной части Каламитского залива. При действии северных и северо-западных ветров к области взмученных вод в Каламитском заливе (с концентрациями 2 – 8 мг/л) добавляется аналогичная область вокруг Гераклеяского полуострова. Однако здесь концентрация ВВ относительно невелика (2 мг/л).

В *подразделе 3.4* рассматривается распределение взвешенного вещества при действии различных ветров на конкретных примерах. На основе проведенного анализа были получены схемы образования и распространения ВВ у западного побережья Крыма, которые изображены на Рисунке 2.

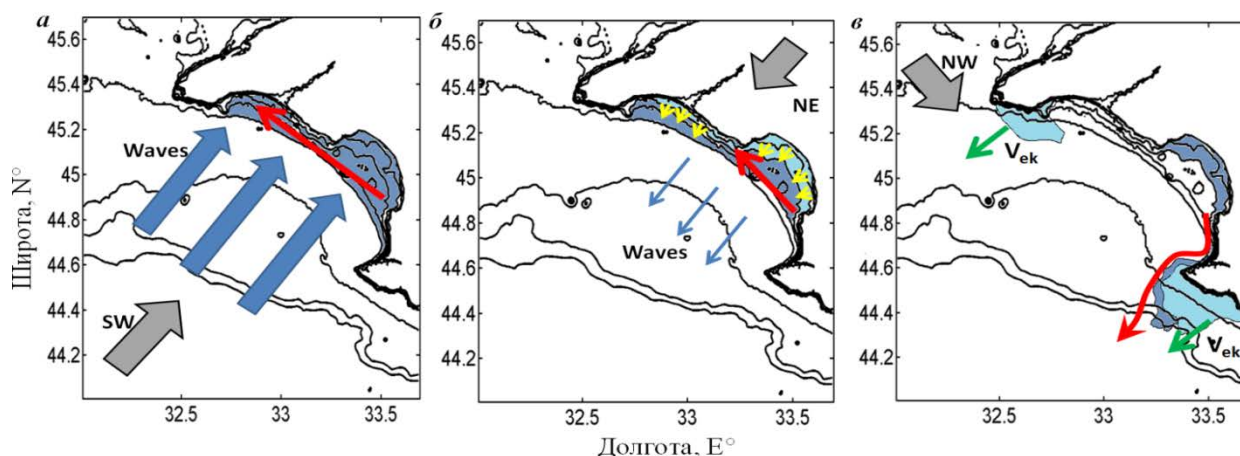


Рисунок 2 – Схемы образования и распространения ВВ при южном и юго-западном ветрах (а); при северо-восточном ветре (б); при северном и северо-западном ветрах (в).

Серая стрелка – направление ветра, синяя – направление волн, красная – направление течения, зеленая – направление экмановской скорости; голубая область – зона ветрового сгона, апвеллинга, синяя область – взмученные воды; желтые стрелки – направление движения вод на мелководье под действием северо-восточного ветра [Алескерова и др., 2019]

Четвертый раздел посвящен исследованию распространения азовоморских вод, проникающих в Черное море через Керченский пролив, на термохалинную структуру, оптические, химические свойства и экосистему северо-восточной части Черного моря. В *подразделе 4.1* приводится описание различий в термохалинных и оптических свойствах Черного и Азовского морей.

В *подразделе 4.2* описывается распространение азовоморских вод при различных штормовых ветрах на конкретных примерах. На основе спутниковых данных проведена классификация распространения азовоморских вод, которую можно разделить на три типа: «западное» и «центральное» распространения и блокирование азовоморских вод в проливе.

При действии северных и северо-восточных ветров наблюдается «западное» распространение, которое усиливает приток азовоморских вод и приводит к их движению на запад в виде потока, прижатого к южному побережью Крыма. Наиболее часто на спутниковых снимках наблюдаются полосы вод шириной от 1 до 10 км с повышенными концентрациями ВВ, распространяющиеся вдоль берегов Крымского полуострова. В отдельных случаях, чаще всего в зимний период, эти полосы прослеживаются вплоть до западной оконечности полуострова Крым (м. Херсонес) иногда даже западнее его до 31 – 32° в.д. Площадь, занятая водами с повышенными концентрациями ВВ, и расстояние, на которое они распространяются, тесно связаны с силой и продолжительностью штормов. Как правило, площадь распространения максимальна в холодный период при северо-восточных ветрах.

Как показывает анализ спутниковых снимков, при воздействии сильных ветров от южных направлений азовские воды в Черном море могут распространяться как на восток, так и на запад от пролива. В этих случаях азовоморские воды обычно проникают до восточного побережья Таманского полуострова или до Анапы на востоке и в Феодосийский залив на западе. Условно обозначим такой тип распространения как «центральный».

При действии сильных южных и западных ветров иногда наблюдаются области взмученных вод, напоминающие «центральный» тип распространения. Однако в отличие от него при высоких концентрациях ВВ пониженных значений температуры не наблюдается. Такое сочетание свойств поверхностных вод можно связать с непосредственным воздействием штормовой ситуации на береговую зону, проявляющуюся в виде разрушения глинистых клифов и взмучивания донных наносов. Данные ветра уменьшают распространение азовоморских вод через Керченский пролив и могут полностью его блокировать.

В *подразделе 4.3* исследуется влияние мезомасштабных вихрей на перенос азовоморских вод, в частности значительное влияние оказывает горизонтальная адвекция мезомасштабными антициклоническими вихрями. Мезомасштабные антициклонические вихри, распространяющиеся в циклоническом направлении по континентальному склону, часто наблюдаются к югу от Керченского пролива на спутниковых снимках [Гинзбург и др., 2002; Митягина и др., 2010] и выделяются по данным альтиметрии [Коротаев и др., 2003]. Мезомасштабные вихри - антициклоны могут вовлекать азовоморские воды в свое орбитальное движение и относить их на расстояние равное диаметру вихря в глубоководную часть моря. Субмезомасштабные вихри могут захватывать азовоморские воды в свои ядра и переносить их на значительные расстояния на запад в потоке Основного Черноморского течения.

В *подразделе 4.4* проведен анализ штормового воздействия на концентрацию взвешенного вещества в районе Керченского пролива. Для исследования влияния штормов на повышение концентрации ВВ в районе Керченского пролива были построены композитные карты концентрации ВВ во время штормов различного направления. Полученные композитные карты (Рисунок 3) можно субъективно разделить на два типа. В первом, во время штормовых ветров северо-восточного, восточного и юго-восточного направлений концентрация ВВ значительно выше к западу от Керченского пролива, чем к востоку от него (Рисунок 3, а, б, в). Во втором, во время южных, юго-западных и западных ветров концентрация ВВ вблизи Таманского полуострова значительно возрастает, высокие значения наблюдаются как к востоку, так и к западу от пролива.

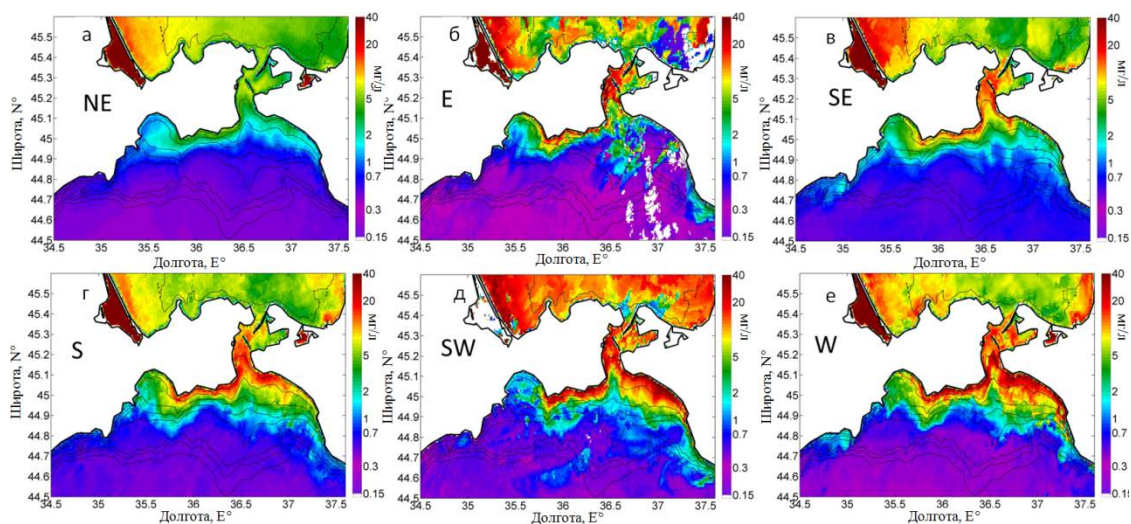


Рисунок 3 – Композитные карты концентрации ВВ при действии штормовых ветров: при северо-восточных (а), восточных (б), юго-восточных (в), южных (г), юго-западных (д) и западных ветрах (е) [Kubryakov et al., 2019]

В *подразделе 4.5* оцениваются сезонная и пространственная изменчивость концентрации взвешенного вещества в районе Керченского пролива. Анализ спутниковых данных показал, что зоны повышенных концентраций ВВ (более 2 мг/л) при штормах локализуются в виде полосы вдоль побережья Керченского полуострова до Феодосийского залива или западнее его, либо в виде двух полос одновременно к западу и востоку от Керченского пролива. Данные полосы расположены вдоль побережья шириной приблизительно 30 км на мелководных участках шельфа (с глубинами менее 30 м). Самые высокие значения концентрации ВВ наблюдаются вблизи побережья и составляют в среднем 5 мг/л. Эти значения соответствуют средней концентрации ВВ в Азовском море и Керченском проливе. Концентрация ВВ увеличивается от значений 0,15 мг/л до более 50 мг/л в водах Черного моря во время штормовых ветров. Поэтому штормовые ситуации вносят большой вклад в полученное среднее распределение концентрации ВВ. Это означает, что усредненные по времени карты не отражают значения концентрации ВВ, наблюдаемые большую часть времени в этой области и, как правило, отражают распределение концентрации ВВ во время типичных штормовых условий. Месячные карты концентрации ВВ, осредненные за 2003 – 2016 гг. показали, что самые высокие значения концентрации ВВ наблюдаются как к югу от Керченского пролива, так и в Азовском море зимой – ранней весной (с января по апрель) (концентрация ВВ больше 10 мг/л). Штормовые ветры в эти месяцы вызывают интенсивное взмучивание донных осадков. Наибольшее проникновение азовоморских вод к западу от пролива наблюдается в феврале. В январе и марте распространение азовоморских вод на запад немного меньше, но в это время максимальна концентрация ВВ наблюдается к востоку от пролива, что указывает на усиление «центрального» типа распространения. С мая по сентябрь значения концентрации ВВ вблизи Керченского пролива значительно меньше (около 1 мг/л), так как в этот период приток азовоморских вод в Черное море уменьшается [Kubryakov et al., 2019]. Кроме того, с ослаблением штормовых ветров в теплое

время года концентрация ВВ в Азовском море, образовавшаяся в результате взмучивания донных осадков, уменьшается. С октября снова наступает штормовая погода и азовоморские воды значительно простираются как на запад до Феодосийского залива, так и на восток, доходя до Анапы (37,2 °в.д.). В ноябре направление потока азовоморских вод на запад более интенсивное из-за увеличения северо-восточных и северных штормов.

Пятый раздел посвящен исследованию субмезомасштабных процессов по спутниковым измерениям. В *подразделе 5.1* проведен анализ субмезомасштабных процессов у побережья Крыма. Рассмотрены некоторые из наиболее типичных и интересных случаев субмезомасштабной динамики, наблюдаемых на изображениях Landsat и Sentinel-2 в различных частях побережья Крыма. На Рисунке 4 представлены некоторые случаи проявления субмезомасштабных вихрей.

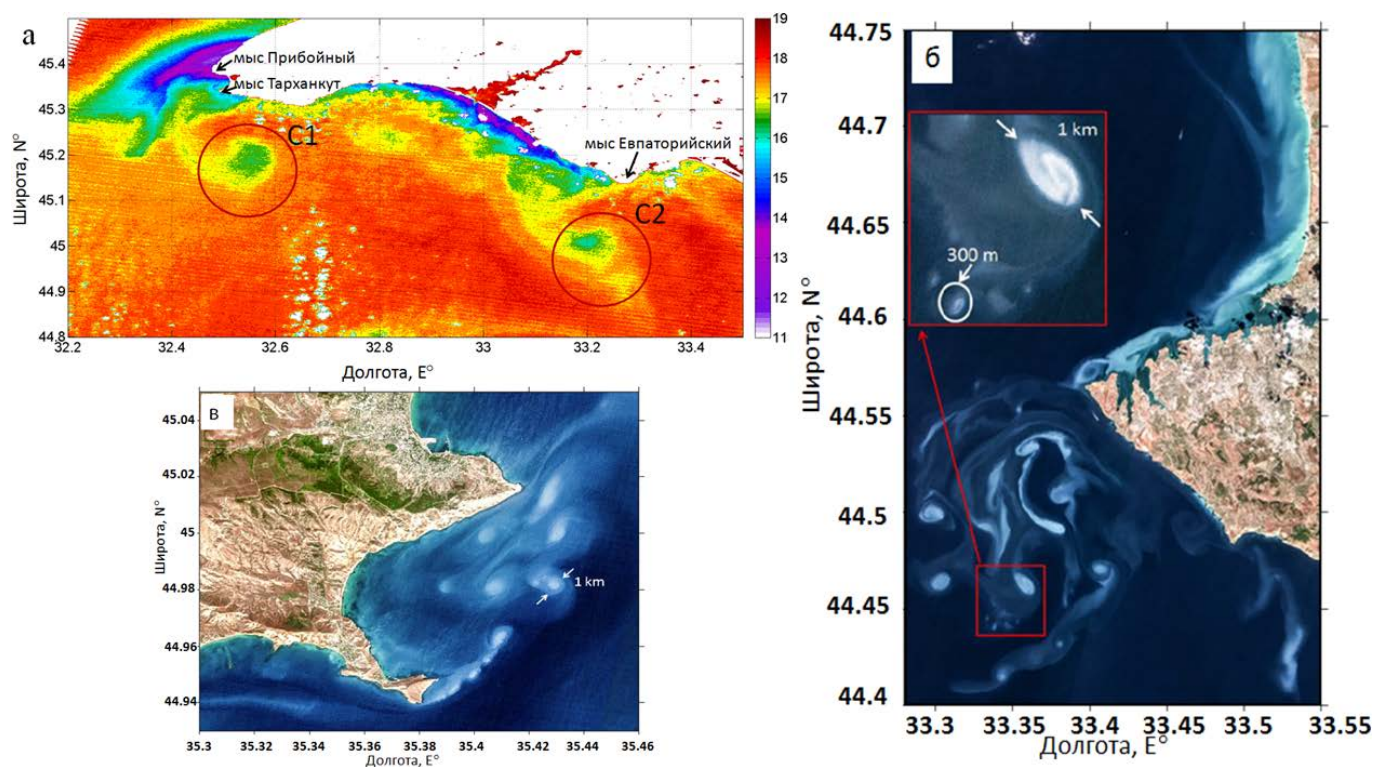


Рисунок 4 – яркостная температура (°C) на снимке Landsat-5 от 21 июня 2009 г. при $\lambda = 10,40\text{--}12,50$ мкм (а). Овалами обозначены вихри; RGB-композиция со спутника Sentinel-2 за 24 сентября 2017 г. (б); RGB-композиция со спутника Sentinel-2 от 2 сентября 2015 г. (в)

В *подразделе 5.2* рассмотрены возможные причины образования субмезомасштабных вихрей у берегов Крыма. По спутниковым снимкам высокого разрешения описано географическое распространение субмезомасштабных вихрей и процессы их образования в различных районах побережья Крыма. Общая географическая схема наблюдаемых процессов показана на Рисунке 5.

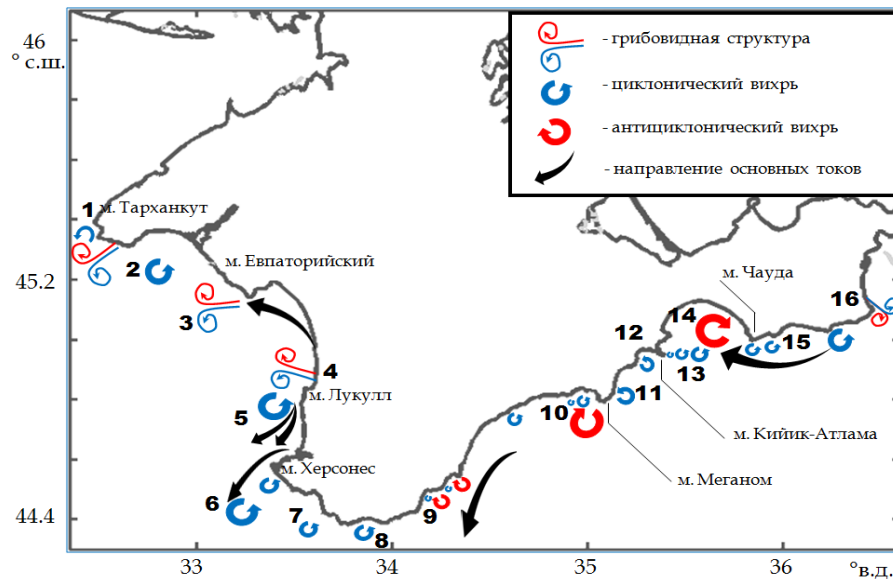


Рисунок 5 – Схема, иллюстрирующая географическое распределение типичных субмезомасштабных структур вблизи побережья Крыма [Aleskerova et. al., 2021]

Несмотря на разнообразие рассмотренных процессов, можно выделить несколько основных возможных причин проявления субмезомасштабных вихрей:

1. Сдвиговая неустойчивость на периферии мезомасштабных антициклонических вихрей.
2. Обтекание потоком воды мысов и выступов берегов.
3. Неустойчивость течения на периферии прибрежных апвеллингов.
4. Возникновение грибовидных течений при торможении прибрежных течений.
5. Образование грибовидных течений на фронте вод с различными свойствами.

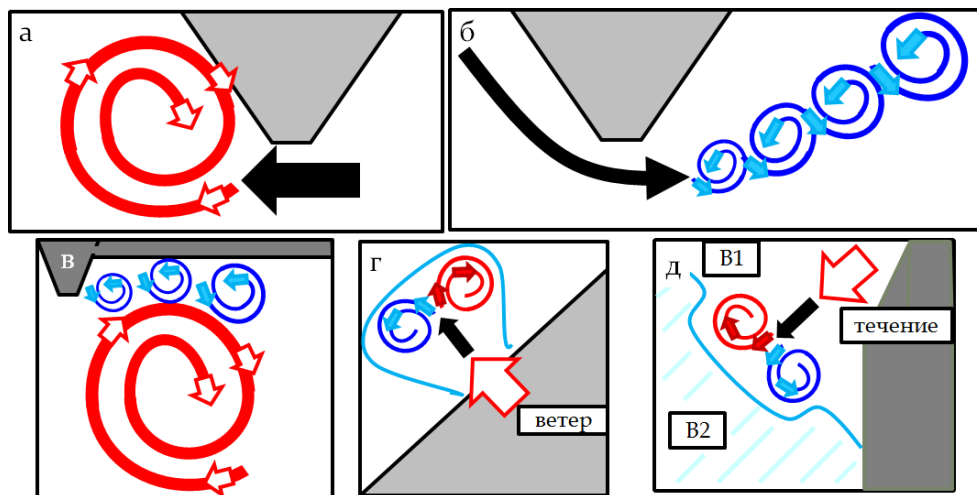


Рисунок 6 – Схемы основных механизмов генерации субмезомасштабных процессов:

- а) образование антициклонического вихря за препятствием при течении, направленном вправо относительно берега; б) образование цепочки циклонических вихрей за препятствием при течении, направленном влево относительно берега; в) образование субмезомасштабных циклонов у берега при прохождении антициклонического вихря; г) образование грибовидных структур при действии сильных ветров, направленных от берега; д) образование грибовидных структур при возникновении апвеллинга [Aleskerova et. al., 2021]

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию субмезомасштабных процессов в акватории у берегов Крыма и определению их влияния на пространственно-временное распределение температуры и оптических характеристик морской поверхности и на перенос взвешенного вещества.

Основные научные результаты исследования могут быть сформулированы следующим образом.

1. Разработан алгоритм восстановления температуры морской поверхности по данным спутника Landsat-8. Представленный алгоритм позволяет восстанавливать температуру поверхности с разрешением 100 м, что дает возможность анализировать пространственную структуру различных явлений на поверхности моря на мелких масштабах. Алгоритм применялся при изучении субмезомасштабных процессов в данной работе.

2. Исследовано влияния штормовых ветров различных направлений на образование и динамику ВВ в прибрежной зоне Западного Крыма. Штормовое волновое воздействие оказывает определяющее влияние на пространственное распределение ВВ. При ветрах различных направлений определяющими распространение ВВ факторами являются: волновое воздействие на берега, взмучивание придонных осадков, ветровое турбулентное перемешивание, циркуляция вод при апвеллинге, вихреобразование.

Было отмечено, что максимальные значения концентрации ВВ принимает при южных ветрах, достигая значений 200 мг/л. Зона высоких концентрации ВВ расположена в районе Западного шельфа Крыма и ограничена изобатой 50 м. Южные, юго-западные ветры разгоняют интенсивные ветровые волны, которые вызывают значительное разрушение берегов, особенно с глинистыми клифами и взмучивание донных наносов.

При северо-восточных ветрах область взмученных вод локализуется на некотором расстоянии от берега из-за малого разгона для образования значимых высот волн. Дополнительным фактором, который может влиять на поддержании низких концентраций взвеси непосредственно у берега, может быть подток относительно прозрачных придонных вод. Из-за отсутствия интенсивного воздействия волн на берег значения концентрации взвеси в этом случае на два порядка ниже, чем для южных ветров.

Особенностью действия северных и северо-западных штормов является образование вдольберегового течения вдоль западного побережья. Течение возникает на фронтальной зоне апвеллинга. Поток переносит ВВ на юг от Каламитского залива и м. Лукулл в глубоководную часть моря. Концентрация ВВ в этом случае также значительно ниже, чем при воздействии южных ветров, однако может достигать величины 3 мг/л.

3. Исследовано пространственное распространение азовоморских вод в северо-восточной части Черноморского бассейна. Проведена классификация их распространения, которое можно разделить на три типа: «западное», «центральное» и блокирование азовоморских вод в проливе, на основе спутниковых данных. При дей-

ствии северных и северо-восточных ветров наблюдается «западное» распространение, которые усиливают приток азовоморских вод и приводят к их движению на запад в виде потока, прижатого к южному побережью Крыма. В зимние месяцы поток азовоморских вод может максимально распространяться вдоль берега на запад. При сильных ветрах с юга, юго-запада и запада наблюдается «центральный» тип распространения, при котором азовоморские воды распространяются вдоль Керченского и Таманского полуостровов. В ряде случаев юго-западные и западные ветры уменьшают распространение азовоморских вод через Керченский пролив и могут полностью его блокировать. Однако на Керченско-Таманском шельфе наблюдается область с высокими значениями концентрации взвешенного вещества в результате взмучивания донных осадков и размыва берегов при ветроволновом воздействии. Распространение азовоморских вод также значительно зависит от мезомасштабной и крупномасштабной геострофической динамики Черного моря. Мезомасштабные антициклонические вихри могут вовлекать азовоморские воды в свое орбитальное движение и способствуют их перемещению в южном направлении в центральную часть бассейна на расстояние, сравнимое с их диаметром (20–60 км). Другой механизм переноса связан с захватом азовоморских вод в ядра субмезомасштабных циклонических вихрей, которые могут переносить азовоморские воды на большие расстояния (более 100 км) в западном направлении.

4. На основе анализа спутниковых данных за период с 1983 по 2019 гг. выполнено картирование типичных субмезомасштабных процессов и определены их характеристики вблизи побережья Крыма. Отмечено, что в прибрежной зоне отмечается большее количество мелких циклонических вихрей с размерами до 1-5 км, и меньше антициклонических, которые, как правило, имеют большие размеры 5-10 км. Показано, что перенос субмезомасштабных циклонических вихрей под действием фоновых течений способствует выносу взвешенных веществ из шельфовых зон, что, в частности, может повлиять на вентиляцию прибрежной зоны. Продемонстрированы примеры образования субмезомасштабных процессов за счёт: сдвиговой неустойчивости на периферии мезомасштабных антициклонических вихрей; обтекание потоков вод мысов и выступов берегов; неустойчивость течения на периферии прибрежных апвеллингов; возникновение грибовидных течений при торможении прибрежных течений; образование грибовидных течений на фронте вод с различными свойствами.

Благодарности

Автор благодарит своего научного руководителя к.ф.-м.н. С.В. Станичного за последовательное руководство и ценные рекомендации; выражает глубокую признательность д.г.н. Горячкину Ю.Н., к.ф.-м.н. Кубрякову А.А., д.г.н. Белокопытову В.Н. за поддержку, чуткое консультирование и помощь в подготовке диссертации. Автор сердечно признательна им за ценные советы и помощь в преодолении возникавших трудностей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах

1. Кременчуцкий Д.А. Определение концентрации взвешенного вещества в Черном море по данным спутника MODIS / Кременчуцкий Д.А., Кубряков А.А., Завьялов П.О., Коновалов Б.В., Станичный С.В., **Алескерова А.А.** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2014. – № 29. – С. 1-9.

2. **Алескерова А.А.** Распространение взвешенного вещества под влиянием штормовых ветров у западного побережья Крыма по оптическим данным высокого разрешения / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. № 1. – С. 63-71.

3. **Aleskerova A.A.** A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements / Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V. // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2016. – Т. 52. – №. 9. – С. 1155-1161.

4. **Алескерова А.А.** Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Горячкин Ю.Н., Станичный С.В. // Морской Гидрофизический Журнал. – 2017. – №6. – С. 53-63.

5. **Алескерова А.А.** Распределение взвешенного вещества у западного побережья Крыма при воздействии сильных ветров различных направлений / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Горячкин Ю.Н., Станичный С.В., Гармашов А.В. // Исследование Земли из космоса. – 2019. – №2. – С. 59-73.

6. 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 / Kubryakov A.A., **Aleskerova A.A.**, Goryachkin Y.N., Stanichny S.V., Latushkin A.A., Fedirko A.V. // Progress in Oceanography. – 2019. Vol. 176.

7. Zatsepin A. Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea / Zatsepin A., Kubryakov A., **Aleskerova A.**, Elkin D., Kukleva O. // Ocean Dynamics. – 2019. – С. 1-14.

8. Kubryakov A.A. Impact of Submesoscale Eddies on the Transport of Suspended Matter in the Coastal Zone of Crimea on the Base of Drones, Satellite and in situ Measurements / Kubryakov A.A., Lishaev P.N., Chepyzhenko A.I., **Aleskerova A.A.**, Kubryakova E.A., Medvedeva A.A., Stanichny S.V. // Oceanology. – 2021. – Vol. 61, No 2. – P. 159-172.

9. **Aleskerova A.** Characteristics of topographic submesoscale eddies off the Crimea coast from high-resolution satellite optical measurements / Aleskerova A., Kubryakov A., Stanichny S., Medvedeva A., Plotnikov E., Mizyuk A., Verzhavskaia L. // Ocean Dynamics. – 2021. – P. 1-23.

Статьи в сборниках научных трудов

10. **Алескерова А.А.** Субмезомасштабные процессы на западном побережье Крыма по измерениям спутников Landsat / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. // Сборник трудов XII конференция молодых ученых «Фундаменталь-

ные и прикладные космические исследования» под ред. А.М. Садовского, 2015. – С. 5-16.

Тезисы докладов на Всероссийских и международных конференциях

11. **Алескерова А.А.** Субмезомасштабные процессы, определяющие распространение взвешенного вещества у западного побережья Крыма / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. // Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала Юга России, Севастополь, 2014. – С. 157.

12. **Алескерова А.А.** Картирование субмезомасштабных процессов у побережья Крыма по спутниковым данным высокого разрешения за 1985-2015 гг. / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. // Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова, Севастополь, 2015. – С. 104.

13. **Алескерова А.А.** Распространение азовских вод по акватории Черного моря по спутниковым данным высокого разрешения / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования. Материалы молодежной научной конференции, г. Севастополь, 25–29 апреля 2016 г. [Электронный ресурс]. – Севастополь: ФГБУН МГИ. – С. 34-39. – Режим доступа: http://mhiras.ru/news/news_201605201055.html, свободный.

14. **Алескерова А.А.** Субмезомасштабные процессы у побережья Крыма по измерениям спутников Landsat и Sentinel-2 / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В., Зацепин А.Г., Медведева А.И. // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. – 2019. Москва. – С. 29-30.

15. **Алескерова А.А.** Субмезомасштабные процессы у побережья Крыма по измерениям спутников Landsat и MODIS / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. // Всероссийские открытые ежегодные конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Дистанционные исследования поверхности океана и ледяных покровов, 14–18 ноября 2016 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – С. 259. – Режим доступа: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/mythesis.aspx?thesis=5725.

16. **Алескерова А.А.** Распространение Керченских вод в северо-восточной части Черного моря по спутниковым данным / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10–14 апреля 2017 г. [Электронный ресурс]. – Москва: ИО РАН. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30062846>, свободный. – С. 24-26.

17. **Алескерова А.А.** Перенос взвешенного вещества у западного побережья Крыма при ветрах различных направлений / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Горячкин Ю.Н., Станичный С.В. // Моря России: методы, средства и результаты исследований / Тезисы докладов всероссийской научной конференции. – г. Севастополь, 24–28 сентября 2018 г. – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2018. – С. 104-105 ISBN 978-5-9908460-5-0.

18. **Алескерова А.А.** Транспорт взвешенного вещества субмезомасштабными вихрями в Черном море / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. // Сбор-

ник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" Институт космических исследований Российской академии наук. – Москва. – 2018. – С. 244.

19. **Алескерова А.А.** Субмезомасштабные вихри в прибрежной части Черного моря и их роль в распространении взвешенного вещества / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Лишаев П.Н., Станичный С.В., Морозов А.Н., Медведева А.В., Плотников Е.В. // Всероссийские открытые ежегодные конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Дистанционные исследования поверхности океана и ледяных покровов, 16–20 ноября 2020 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – DOI 10.21046/18DZZconf-2020a.

20. **Алескерова А.А.** Прибрежные субмезомасштабные вихри у Крыма по спутниковым измерениям и механизмы их образования / Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В., Медведева А.И. // Всероссийские открытые ежегодные конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Дистанционные исследования поверхности океана и ледяных покровов, 11–15 ноября 2019 г. [Электронный ресурс] – Москва: ИКИ РАН. – DOI 10.21046/17DZZconf-2019a.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук
Алескеровой Анны Адиловны

Подписано к печати 10.03.2022 г. Формат бумаги 60×84 1/16
Объем 0,9 п.л. Заказ № 329 Тираж 100 экз.

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