

На правах рукописи

Рубакина Валентина Александровна

**СУТОЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЧЕРНОГО
МОРЯ И ИХ ВКЛАД В ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ
СТРУКТУРЫ ВОД**

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь – 2022

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

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, **Кубряков Арсений Александрович**

Официальные оппоненты:

Заболотских Елизавета Валериановна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет», ведущий научный сотрудник лаборатории спутниковой океанографии

Лаврова Ольга Юрьевна, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, ведущий научный сотрудник и руководитель лаборатории аэрокосмической радиолокации

Ведущая организация:

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

Защита состоится 31 марта 2023 г. в 11 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_202212141610.html

Автореферат разослан «20» января 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.02
кандидат физико-математических наук

Алексеев Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Мониторинг и исследование особенностей суточных колебаний температуры поверхностного слоя моря/океана (далее ТПМ/ТПО) является одной из наиболее актуальных задач современной океанологии, поскольку именно эти высокочастотные колебания вносят существенный вклад в турбулентный обмен теплом и импульсом между океаном и атмосферой, оказывают воздействие на формирование ветров (Stuart-Menteth et al., 2003; Marullo et al., 2016). Изменения стратификации вод, связанные с суточными колебаниями потоков тепла, влияют на физические и биогеохимические процессы в верхних слоях моря (океана) (Stuart-Menteth et al., 2003; Рубакина и др., 2019).

ТПМ является важнейшей характеристикой состояния всего Мирового океана, и Черного моря в частности, т.к. она влияет на климат и функционирование экосистемы планеты, модулирует газообмен (Karagali et al., 2014) и оказывает существенное воздействие на процессы в атмосфере. Повышение ТПМ может привести к более частому возникновению тропических циклонов, ураганов и тайфунов, их усилению и в результате – увеличению причиняемого ими ущерба (Meredith et al., 2015). Суточный ход ТПМ может оказывать влияние на бризовые ветры (Ефимов и др., 2009; Efimov et al., 2016). Этот параметр непосредственно используется в расчетах турбулентного теплообмена между океаном и атмосферой (Marullo et al., 2016; Рубакина и др., 2018b). Отдельный интерес представляет суточный ход температуры для моделирования системы «океан-атмосфера», долгосрочных климатических трендов температуры и различных процессов в океане, а также для систем прогноза.

Детальное исследование суточного хода температуры представлено в ограниченном количестве отечественных работ (Колесников и др., 1955; Завьялов, 1992b; Завьялов и др., 1991, 1992; Мысленков и др., 2017; Дубравин и др., 2018, 2019). Для Черного моря таких работ еще меньше. Это связано, прежде всего, с отсутствием достаточного количества данных с приемлемым для исследования временным разрешением. В работе (Завьялов, 1992a) для исследования суточных колебаний использовались данные о суточном ходе температуры вод Черного моря, собранные НИС «Московский Университет» в ходе экспедиций в 1985 – 1986 гг. В работе (Большаков, 2011) рассмотрен суточный ход температуры у побережья Одессы. Новые возможности для исследования суточного хода температуры открылись с появлением данных с высоким временным разрешением. Во-первых, это данные приборов на геостационарной орбите. Одним из таких приборов является радиометр SEVIRI (Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager), который установлен на геостационарных метеоспутниках Meteosat второго поколения (MSG). Данный радиометр позволяет получать изображения поверхности Земли с высоким временным разрешением (до 15 минут). Во-вторых, это контактные данные термодрифтеров с временным разрешением до 30 минут. Потенциальные возможности использования этих данных в Черном море представлены лишь в одной работе (Акимов и др., 2014). Современное численное моделирование с высоким разрешением (как пространственным, так и

временным) позволяет проанализировать особенности суточного хода температуры на различных горизонтах, а также его взаимосвязь со стратификацией, прогревом глубинных слоев и т.д.

Цель работы – исследование суточных колебаний термических характеристик верхнего слоя Черного моря под влиянием различных гидрометеорологических факторов на основе комплексного анализа данных сканера SEVIRI, термопрофилирующих дрейфующих буев, поля ветра и данных моделирования.

Задачи исследования:

1. Исследовать суточный ход температуры поверхностного слоя вод Черного моря (пространственные и сезонные особенности) и определить изменчивость его амплитуды на основе данных с высоким временным разрешением сканера SEVIRI, термопрофилирующих дрейфующих буев и результатов численного моделирования.

2. Исследовать зависимость амплитуды суточного хода температуры от поля ветра, потоков тепла, температуры воздуха и вертикальной компоненты скорости течений, а также ее сезонную изменчивость.

3. Оценить перепад температуры в скин-слое на основе данных SEVIRI и термодрифтеров и исследовать его сезонную и суточную изменчивость, а также зависимость от ветра, величин полного и скрытого потока тепла, относительной влажности, температуры воздуха. Оценить условия существования выраженного скин-слоя, а также рассмотреть условия применимости модели скин-слоя Саундерса для района Черного моря.

4. Исследовать вертикальное распределение характеристик суточных колебаний температуры по данным численного моделирования и контактных измерений термодрифтеров. Рассмотреть особенности вертикального распределения этих характеристик в зависимости от определяющих гидрометеорологических факторов.

5. Исследовать влияние суточного хода температуры на вертикальную термическую структуру вод и толщину ВКС.

Объект исследования – поверхностный слой вод Черного моря.

Предмет исследования – термические характеристики поверхностного слоя вод Черного моря.

Метод исследования. В работе использовались дистанционные методы исследования – ИК-измерения сканера SEVIRI; контактные методы – данные термопрофилирующих дрейфующих буев; методы численного моделирования – (модели NEMO, POM). Для обработки данных привлекался математический пакет MATLAB.

Научная новизна исследования.

1. Получено, что наибольшая изменчивость суточного хода температуры в поверхностном слое Черного моря имеет место в весенне-летний период в утренние и вечерние часы. В холодный период года температура на поверхности меньше, чем в нижележащих слоях.

2. Наибольшие амплитуды суточного хода температуры приходятся на весенне-летний период. В среднем, максимальные величины температуры и амплитуды

суточного хода имеют место в юго-восточной части черноморского бассейна, где находится зона ветровой тени. Определено, что события экстремального дневного прогрева с амплитудами суточного хода температуры $5\text{--}7^{\circ}\text{C}$ формируются в условиях малой облачности при скоростях ветра до 5 м/с . Определена зависимость амплитуды суточного хода температуры от скорости ветра, потоков тепла, температуры воздуха, исследовано ее распределение в различные месяцы года для различных интервалов скоростей ветра.

3. Найдено частное аналитическое решение для нелинейной системы уравнений модели Крауса-Тернера при специальном выборе параметров атмосферного воздействия.

4. Впервые установлены количественные зависимости величины перепада температуры в скин-слое от различных гидрометеорологических факторов для района Черного моря, исследована суточная изменчивость перепада температуры в скин-слое. Определены условия существования выраженного скин-слоя, а также условия, в которых применима теория скин-слоя Саундерса для Черного моря.

5. Установлены сезонные и пространственные особенности суточных колебаний температуры на различных горизонтах, глубина проникновения суточных колебаний, их интенсивность, связь с вертикальной компонентой скорости течений.

6. Впервые на основе численного моделирования определена взаимосвязь суточного хода температуры с прогревом нижележащих слоев в весенний период, стратификацией и толщиной ВКС.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы.

Выполненный в работе сравнительный анализ данных, полученных прибором на геостационарной орбите SEVIRI, с контактными измерениями и результатами численного моделирования, демонстрирует перспективные возможности использования данных этого сканера для исследования различных короткопериодных процессов и явлений в Черном море. Определены условия возникновения событий значительного и экстремального дневного прогрева, а также закономерности формирования зон интенсивного дневного прогрева. В работе представлены результаты статистического анализа событий дневного прогрева на основе большого массива данных дистанционного зондирования и контактных измерений. Проведенное в работе исследование зависимости перепада температуры в скин-слое Черного моря от различных гидрометеорологических факторов и полученные численные зависимости могут быть использованы для коррекции данных дистанционного зондирования и применяться в численных моделях. Определены условия применимости модели скин-слоя Саундерса в Черном море.

Положения, выносимые на защиту.

1. Особенности сезонного и пространственного распределения суточного хода температуры вод Черного моря. Для событий экстремального прогрева амплитуды суточного хода температуры достигают $5\text{--}7^{\circ}\text{C}$. Воспроизведение этих событий на основе результатов численного моделирования продемонстрировало необходимость

коррекций параметров поглощения ИК-излучения и усовершенствование параметризации турбулентности у поверхности моря.

2. Взаимосвязь амплитуды суточного хода температуры с полем ветра, потоками тепла, температурой воздуха и вертикальной компонентой скорости течений в широком диапазоне изменчивости этих параметров

3. Нижняя граница, до которой обнаруживаются суточные колебания температуры, зависит от положения скачка плотности, который влияет на пространственные особенности проникновения суточных колебаний. В теплый период года суточные колебания не проникают ниже 8–10 м, а в холодный период они могут проникать в слои до 50 м в зонах даунвеллинга.

4. Суточные колебания стратификации вод оказывают значимое влияние на термическую структуру Черного моря в слое 0–50 м. Действие ветрового перемешивания в период ночной конвекции и ослабление стратификации приводят к усилению проникновения потоков тепла в нижние слои.

5. Количественные зависимости термических характеристик скин-слоя от поля ветра и потоков тепла в широком диапазоне их изменения, особенности его суточного и сезонного хода. Теория скин-слоя Саундерса для Черного моря реализуется в узком диапазоне величин скорости ветра и полного потока тепла.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность научных результатов подтверждается проведенной многосторонней валидацией используемых данных контактных и спутниковых измерений, а также результатов численного моделирования. Выполнен сравнительный анализ данных сканера SEVIRI и контактных измерений термодрифтеров, проведено сопоставление результатов расчета с использованием модели NEMO и данных сканера SEVIRI. Сравнительный анализ и валидация показали хорошее согласование сопоставляемых данных. Полученные результаты также согласуются с результатами исследований в других регионах, опубликованными в литературе.

В работе использовались статистически значимые ряды данных – массивы спутниковых и контактных измерений за многолетний период (данные сканера SEVIRI с 2005 по 2016 гг., результаты измерений термодрифтеров за 2005–2007, 2009, 2013–2014 гг.). Численные эксперименты проводились с использованием одномерной гидродинамической модели РОМ, валидация и широкая апробация которой выполнена в большом числе отечественных и зарубежных работ.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации представлялись на семинарах отдела дистанционных методов исследования и отделения оперативной океанографии ФГБУН ФИЦ МГИ, а также на российских и международных конференциях, школах, представлены в публикациях ведущих рецензируемых отечественных изданиях. Цикл работ «Суточные колебания температуры верхнего слоя Черного моря и их вклад в изменчивость вертикальной термической структуры вод», который является частью настоящей диссертационной работы, в 2022 г. отмечен премией для молодого ученого имени В.В. Шулейкина, учрежденной в Морском гидрофизическом институте РАН.

Публикации по теме диссертации. Результаты работы опубликованы в соавторстве в 20 научных работах, из них 4 публикации [1–4] в рецензируемых журналах, удовлетворяют требованиям ВАК при Минобрнауки России и включены в международные наукометрические базы данных «SCOPUS» и «Web of Science», а также 16 тезисов докладов на научных конференциях, входящих в базу данных РИНЦ.

Связь диссертационной работы с научными программами. Работа выполнялась в соответствии с планами и программами научных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» в рамках следующих научно-исследовательских проектов и государственных заданий:

— тема «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология»), 0827-2019-0002, исполнитель;

— тема «Разработка перспективных методов, программно-информационных и технических средств исследований гидрофизических, биогеохимических, оптических характеристик морской среды, в том числе методами дистанционного зондирования» (шифр «Перспективные методы»), 0555-2019-0001, исполнитель;

— проект РФФИ «Комплексные исследования изменчивости температуры приповерхностного слоя Черного моря в ходе суточного цикла», №19-35-90084 (2019–2022 гг.), исполнитель;

— тема «Разработка перспективных методов, программно-информационных и технических средств исследований гидрофизических, биогеохимических, оптических характеристик морской среды, в том числе методами дистанционного зондирования» (шифр: «Перспективные методы»), 0555-2021-0006 (FNNN-2021-0006), исполнитель;

— тема «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология»), FNNN-2021-0003, исполнитель.

Личный вклад автора. Соискателем совместно с научным руководителем определена актуальность темы исследования, поставлена цель и сформулированы основные задачи. Соискателем лично выполнен аналитический обзор имеющихся литературных данных о современных подходах к изучению суточного хода температуры поверхностного слоя вод.

Автор участвовал в планировании и выборе методов исследований, разработке программ обработки данных, подготовке текстов статей и полной обработке всех представленных в работе данных: спутниковых и контактных измерений, данных реанализов и результатов численного моделирования. Автор принимал участие в постановке и проведении численных экспериментов, а также в интерпретации полученных результатов.

Автором лично выполнен сравнительный анализ данных дистанционного зондирования и измерений термодрифтеров, а также валидация результатов расчета с использованием модели NEMO по спутниковым данным. Лично соискателем проведено исследование пространственных и сезонных особенностей суточного хода температуры, рассмотрена связь его амплитуды с различными гидрометеорологическими факторами, исследовано статистическое распределение событий дневного прогрева, выполнены расчеты с использованием модели ROM.

Обобщение, анализ и интерпретация полученных результатов выполнены автором совместно с научным руководителем.

Благодарности. Автор диссертации выражает искреннюю благодарность к. ф.-м. н., Кубрякову А.А и к. ф.-м. н. Станичному С.В. за помощь в выборе тематики для исследования, курирование работы, внимание к исследованию, руководство и поддержку на всех этапах выполнения работы. Соискатель признательна д. ф.-м. н. Чухареву А.М. и д. г. н. Белокопытову В.Н. за поддержку работы, конструктивные замечания и помощь в подготовке диссертации.

Структура и объем работы. Работа состоит из Введения, пяти Разделов, Заключение, Списка сокращений и условных обозначений, Списка использованных источников. Объем работы составляет 201 страницу. Текст исследования иллюстрирован 62 Рисунками и 3 Таблицами. Библиографический список включает в себя 161 наименование, в том числе 103 на английском языке.

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 посвящен обзору современных подходов к исследованию суточного хода температуры поверхностного слоя вод. В *подразделе 1.1* представлен краткий обзор исследований суточного хода температуры поверхностного слоя океанов и морей. Одной из наиболее важных характеристик состояния как всего Мирового океана, так и Черного моря, является температура поверхностного слоя океана/ моря (далее ТПО/ТПМ), которая влияет на климат и функционирование экосистемы планеты. Повышение температуры поверхностного слоя моря может привести к более частому возникновению тропических циклонов, ураганов и тайфунов, к их усилению и, соответственно, к увеличению причиняемого ими ущерба и масштабов возникающих наводнений, усугубляемых повышением уровня моря. Перепад ТПМ может являться причиной отклонений в данных о поле ветра, полученных с помощью скаттерометров. С увеличением ТПМ увеличивается отток CO₂ из океана (Karagali et al., 2014). Величина ТПМ непосредственно используется в расчетах турбулентного

теплообмена между океаном и атмосферой (Marullo et al., 2016; Rubakina et. al, 2021). В Черном море также ведутся наблюдения за ТПМ. В частности, проводились дрейфтерные эксперименты с последующим созданием базы данных дрейфтерного мониторинга Черного моря за 2001–2006 гг. (Ратнер и др., 2009). Однако детальным исследованиям суточных колебаний температуры посвящено ограниченное количество отечественных работ (Колесников, Пивоваров, 1955; Завьялов, 1992а, 1992b; Завьялов и др., 1991, 1992; Мысленков и др., 2017; Дубравин и др., 2018, 2019). Первые оценки ТПМ по данным, полученным дистанционными методами, были выполнены в 70-х годах XX века в работах (Anding et al., 1970) и (Prabhakara et al., 1974). Точность измерения ТПМ на сегодняшний день возросла от нескольких градусов до нескольких десятых градуса по сравнению с работами 70-х годов. Новые данные о высокочастотной изменчивости температуры стали доступны благодаря появлению ИК-радиометров на геостационарной орбите. Одним из современных приборов для определения ТПМ является сканер Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (далее SEVIRI), установленный на геостационарных метеорологических спутниках Meteosat Second Generation (MSG) (Marullo et al., 2016). Сканер SEVIRI позволяет получать данные о поле температуры с дискретностью 15 минут с пространственным разрешением от 4 до 6 км. Такие параметры прибора позволяют эффективно использовать его данные для изучения циклического процесса дневного прогрева (Gentemann et al., 2008a; Marullo et al., 2010; Merchant et al., 2008; Filipiak et al., 2012).

В *подразделе 1.2* рассмотрены проблемы сопоставления спутниковых и контактных данных, а также различные подходы к исследованию термического скин-слоя и его влиянию на спутниковые измерения. Методики восстановления температуры приповерхностного слоя океана по данным ДЗЗ в ИК-диапазоне ориентированы, в первую очередь, на компенсацию влияния атмосферы – основного искажающего фактора. Кроме этого, отличие величины коэффициента излучения водной поверхности от единицы и, как следствие, отличие радиационной температуры поверхности от термодинамической температуры также могут влиять на ошибки ИК-измерений, особенно в зоне солнечного блика (Лебедев и др., 1994; Rubakina et. al., 2021). Вопрос сопоставления данных ДЗЗ с контактными данными для акватории Черного моря является одним из наиболее актуальных. В работе (Плотников и др., 2007) выполнено сопоставление данных радиометра AVHRR, ИЗС NOAA, с измерениями SVP-термодрифтеров. В работе (Ратнер и др., 2004) представлена оценка точности восстановления ТПМ Черного моря по данным аппаратуры AVHRR-3 ИЗС NOAA с использованием данных SVP-дрифтеров, полученных в ходе дрейфтерного эксперимента в 2003 г. Одной из наиболее важных причин, из-за которой имеет место отличие радиационной температуры морской поверхности от температуры верхнего слоя вод, определяемым *in situ*, является наличие скин-слоя с выраженным перепадом температуры, который образуется из-за энергообмена океана с атмосферой (Woodcock et al., 1947; Saunders, 1967). О холодном скин-слое на границе воздух-море известно уже несколько десятилетий благодаря тщательным наблюдениям *in situ* (Woodcock et

al., 1947; Katsaros et al., 1977; Mammen et al., 1990; Ward et al., 2004a; Ward et al., 2006) и радиометрическим измерениям, проведенным в широком диапазоне условий (Woodcock et al., 1947; Saunders, 1967; McAlister al., 1969; Hepplewhite et al., 1989; Schluessel et al., 1990; Jessup et al., 1997; Minnett et al., 2001; Minnett et al., 2003). При исследовании скин-слоя и скин-эффекта чаще всего рассматривается разница температуры непосредственно самого скин-слоя и ТПМ (далее ΔT). ΔT получают с использованием как исключительно контактных методов (измерения температур с борта корабля, а также с заякоренных и дрейфующих буев), так и с применением комплексных данных дистанционного зондирования и контактных измерений. В *подразделе 1.3* представлены современные подходы к учету суточного хода температуры в численном моделировании. Первое подробное моделирование суточного цикла температуры было выполнено в работе (Price et al., 1986), в которой разработана интегральная модель перемешанного слоя, зависящая от возникновения сдвиговой неустойчивости в перемешанном слое. Модели суточной изменчивости ТПО в целом можно разделить на простые параметризации, модели перемешанного слоя и турбулентные или диффузионные модели. В параметризациях используется скорость ветра и нисходящее коротковолновое излучение для прогнозирования максимальной амплитуды суточного цикла. Параметризации вычислительно эффективны и просты в использовании, но в большинстве своем они адаптированы к местным условиям (Webster et al., 1996; Gentemann et al., 2003; Clayson, Weitlich, 2007). Интегральные модели перемешанного слоя воспроизводят перемешанный слой и распределяют поверхностные потоки тепла и импульса по его глубине. Хотя эти модели более физически обоснованы, чем параметризации, они не включают некоторые динамические процессы, которые способствуют взаимодействию воздух-море. Замкнутые турбулентные модели физически более реалистичны, но требуют больших вычислительных затрат. В работе (Kantha, Clayson, 1994) была разработана модифицированная модель перемешанного слоя, которая показала хорошие результаты в воспроизведении изменчивости ТПО. Общая модель турбулентности океана – General Ocean Turbulence Model (GOTM) (Burchard, Petersen, 1999) успешно использовалась в работе (Hallsworth, 2005). В работе (Pimentel et al., 2019) модель GOTM использована для моделирования суточного цикла ТПО в Средиземном море. Модель GOTM включает различные схемы замыкания турбулентности (Burchard, Petersen, 1999). Данные о суточном ходе температуры, в частности данные SEVIRI и результаты расчета с использованием модели Nucleus for European Modelling of the Ocean (далее NEMO), находят применение в различных системах прогноза, что значительно улучшает качество воспроизводимых системой показаний ТПО/ТПМ (Storto, Oddo, 2019; O’dea et al., 2012; Ascione Kenov et al., 2016). Таким образом, современные численные океанологические модели дают возможность исследовать пространственную изменчивость суточных колебаний температуры, а также рассмотреть их взаимосвязь с вертикальной термической структурой, стратификацией и толщиной ВКС.

В Разделе 2 представлены результаты исследования суточного хода температуры поверхностного слоя Черного моря по данным термопрофилирующих дрейфующих буев и сканера SEVIRI. В *подразделе 2.1* описаны данные, использованные в работе. Это данные термодрифтеров (за 2005–2007, 2009, 2013–2014 гг.) и сканера SEVIRI (за 2005–2016 гг.) с высоким временным разрешением, а также данные реанализов Era-Interim и Era5. В *подразделе 2.2* выполнен анализ сезонных особенностей суточного хода температуры на различных горизонтах на основе контактных измерений термодрифтеров. Исследована высокочастотная изменчивость температуры по измерениям отдельных дрейфтеров. Эти измерения термодрифтеров в слое 0,2 м хорошо регистрируют суточные колебания температуры, также выделяются события значительного дневного прогрева. Рассмотрен средний сезонный и суточный ход температуры вод в верхнем слое. Определено, что максимальные отклонения суточного хода температуры в слое 0,2 м от среднемесячных величин температуры имеют место в весенне-летний период, а в течение суток максимальные аномалии приходятся на утро (с 4.00 до 9.00) и послеобеденные часы (с 15.00 до 19.00) (что совпадает с периодами ночной конвекции и дневного прогрева соответственно). Также в *подразделе 2.2* выявлены особенности суточного хода температуры в холодный и теплый период года на различных горизонтах. Для холодного периода года анализ показал наличие ряда особенностей. Для данного периода характерна несущественная разница температуры вод для горизонтов 0,2 м и 12,2 м. Это связано с отсутствием стратификации водных слоев по температуре в холодный период года. В январе-марте температура на горизонте 0,2 м ниже, чем в глубинных слоях, на горизонтах 12,2 м и даже 15,2 м. В феврале-марте в дневные часы прогрев становится более интенсивным, чем в январе, и температура поверхностного слоя становится выше, чем на горизонте 12,2 м. В теплый период года прослеживается устойчивая температурная стратификация вод, температура в слое 0,2 м значительно выше, чем у вод, лежащих ниже. В *подразделе 2.3* представлены результаты сравнительного анализа данных сканера SEVIRI и термодрифтеров. Полученные величины коэффициентов корреляции, СКО, коэффициентов регрессии и разницы средних для сравниваемых данных свидетельствуют о достаточно хорошем согласовании сопоставляемых данных. Можно заключить, что данные SEVIRI возможно успешно использовать для исследования суточного хода температуры в Черном море.

В *подразделе 2.4* рассмотрен суточный ход ТПМ в Черном море и его сезонная динамика. Исследование среднего суточного хода показало, что распределение аномалий для ТПМ по данным сканера SEVIRI, носит схожий характер с распределением аномалий, полученным по данным дрейфтеров. Наибольшие аномалии ТПМ имеют место в весенне-летний период, с апреля по июль, а в течение суток наибольшие аномалии приходятся на утренние и послеобеденные часы. Для исследования особенностей суточного хода ТПМ в работе рассчитана и проанализирована амплитуда суточного хода ТПМ (A). По вычисленным массивам A построены карты ее распределения и проведен анализ пространственных и временных особенностей. Были вычислены средние значения по бассейну, а также

среднемесячный ход A по бассейну за многолетний период с 2005 по 2016 гг. Наибольшие величины A в среднем приходятся на май-июль. Были также выявлены пространственные особенности в распределении A . Наибольший перепад ТПМ наблюдается в юго-восточном районе и в прибрежной части юго-западного района Черного моря. Наименьшие значения A свойственны его центральной и западной части. Такая пространственная изменчивость связана прежде всего с распределением поля скорости ветра – зона ветровой тени совпадает с районом максимальных величин A . В *подразделе 2.4* также проведен статистический анализ количества событий дневного прогрева в различных интервалах значений A с использованием дистанционных и контактных данных. Наиболее редкими являются события прогрева с A , равными 5–7°C и более (события экстремального дневного прогрева), наибольшее число таких событий приходится на весенний период, что можно объяснить минимальными скоростями ветра именно в этот период года.

На Рисунке 1 представлены результаты исследования зависимости A по данным сканера SEVIRI за многолетний период от ряда гидрометеорологических факторов – скорости ветра, потоков тепла, температуры воздуха, а также распределение A в различные месяцы года при различных скоростях ветра.

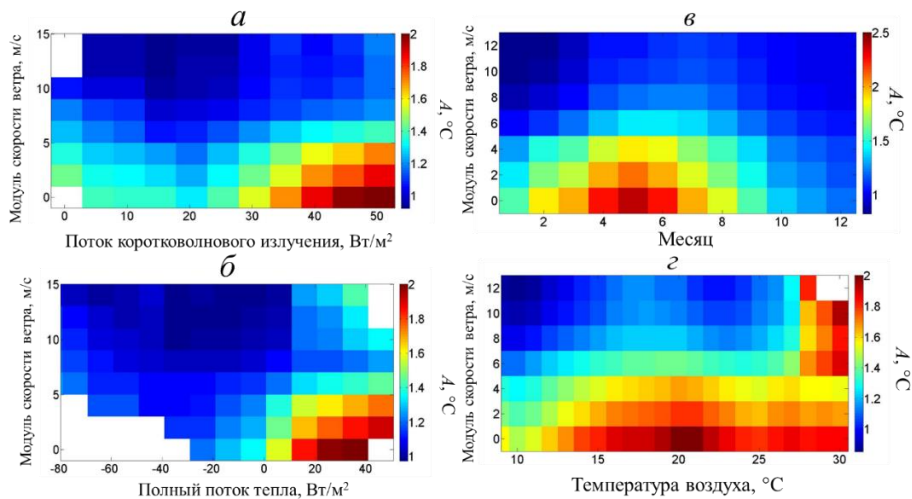


Рисунок 1 – Диаграмма зависимости: *а* – амплитуды суточного хода температуры от модуля скорости ветра и потока коротковолнового излучения; *б* – амплитуды суточного хода температуры от модуля скорости ветра и полного потока тепла; *в* – амплитуды суточного хода температуры от модуля скорости ветра в различные месяцы года; *з* – амплитуды суточного хода температуры от модуля скорости ветра и температуры воздуха

Наименьшие значения A наблюдаются в холодный период года, в декабре – марте, когда происходит остывание вод, полный поток тепла направлен в атмосферу (т.е. отрицателен), при сильных ветрах и низких температурах воздуха. Максимальные A приходятся на май-август, т.е. в период прогрева, когда полный поток тепла направлен в море (т.е. положителен), а температура воздуха принимает наибольшие значения, при скоростях ветра от 0 до 5–6 м/с.

В подразделе 2.5 рассмотрены события значительного и экстремального дневного прогрева по спутниковым и контактными данным. Определено, что события значительного дневного прогрева (т.е. такие события в каком-либо сезоне года, для которых A значительно выше, чем в среднем A для этого сезона) имеют место в течение всего года, но наибольшее их количество приходится на весну. В зимний период имеют место события прогрева с A , равной $0,5^{\circ}\text{C}$, которые зафиксированы как контактными измерениями дрейфтеров в слое $0,2$ м, так и по данным SEVIRI. В районе пребывания дрейфтера отсутствовала облачность, а скорости ветра не превышали $3,5\text{--}4$ м/с.

Один из примеров события значительного дневного прогрева в теплый период года рассмотрен на Рисунке 2. Это событие прогрева определено 12.07.05 по данным дрейфтера № 34253. Величина суточного прогрева составила $4,5^{\circ}\text{C}$ по контактными измерениям. По данным SEVIRI, зафиксированная амплитуда суточного хода составила $2,5^{\circ}\text{C}$, что несколько ниже, чем значение, полученное по данным дрейфтера. В зоне пребывания дрейфтера 12.07.05 облачный покров отсутствовал, а скорость ветра не превышала $4\text{--}5$ м/с.

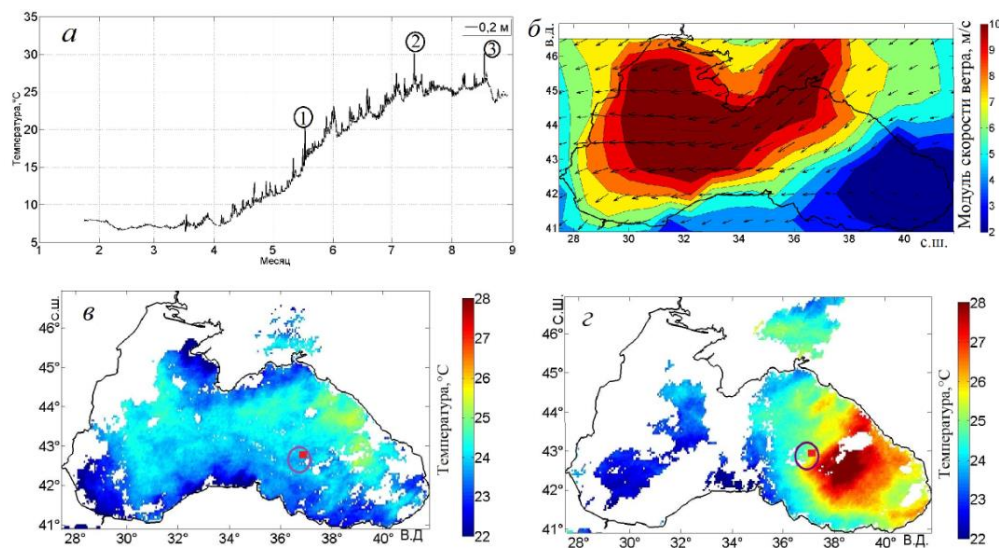


Рисунок 2 – Временной ход температуры на горизонте $0,2$ м с января по август 2005 г. (а); карта распределения среднего модуля скорости ветра и его направления в 9.00 (черные стрелки) за 12.07.05 (б); карта распределения ТПИИ 12.07.05 в 4.00 по данным SEVIRI (в); карта распределения ТПИИ 12.07.05 в 17.00 по данным SEVIRI (г).

Красными точками на Рисунке 2, в и г обозначена траектория дрейфтера за рассматриваемый временной интервал

По данным сканера SEVIRI было также рассмотрено событие прогрева 11.05.15. В некоторых точках бассейна 11.05.15 амплитуда суточного хода достигает экстремально высоких значений и составляет $7\text{--}7,2^{\circ}\text{C}$. Практически над всей акваторией Черного моря в этот день было безоблачно, а скорость ветра не превышала 4 м/с. Столь же высокие значения зафиксированы и в районе Атлантического океана в предыдущих работах, в частности в работе (Gentemann et al., 2008a). Таким образом,

можно заключить, что события значительного и экстремального дневного прогрева формируются в условиях слабого/отсутствующего облачного покрова при низких скоростях ветра (до 4–5 м/с).

Раздел 3 посвящен результатам исследования зависимости A от различных гидрометеорологических факторов на основе численного моделирования. В *подразделе 3.1* рассмотрена связь суточного хода температуры с полем ветра и полным потоком тепла на основе результатов расчета с использованием одномерной интегральной модели ВКС. Найдено частное аналитическое решение для нелинейной системы уравнений модели Крауса-Тернера при специальном выборе параметров атмосферного воздействия.

Динамика ВКС в зависимости от режима будет описываться двумя различными системами нелинейных дифференциальных уравнений, в которых искомыми величинами являются температура T_s и толщина h перемешанного слоя:

при деградации ВКС, т.е. при $\frac{dh}{dt} < 0$

$$\begin{cases} h \frac{dT_s}{dt} = Q_0, \\ G-D = \frac{g\alpha h}{2} Q_0, \\ Q_h = 0 \end{cases} \quad (1)$$

при вовлечении вод в ВКС, т.е. при $\frac{dh}{dt} > 0$

$$\begin{cases} h \frac{dT_s}{dt} = Q_0 - Q_h, \\ G-D = \frac{g\alpha h}{2} (Q_0 + Q_h), \\ Q_h = \frac{dh}{dt} (T_s - T_h). \end{cases} \quad (2)$$

Начальные условия для обеих систем

$$h = h_0, \quad T_s = T_s^0, \quad \text{при } t = t_0. \quad (3)$$

Окончательное решение имеет вид

при $\frac{dh}{dt} < 0$ (деградация ВКС)

$$\begin{cases} h(t) = \frac{K}{Q_0(t)}, \\ T_s(t) = \frac{1}{K} \int_{t_0}^t Q_0^2(t) dt + T_s^0 \end{cases} \quad (4)$$

при вовлечении вод в ВКС, т.е. при $\frac{dh}{dt} > 0$

$$\begin{cases} h(t) = \frac{K(t-t_0) + h_0^2(T_s^0 - T_h)}{\int_{t_0}^t Q_0(t) dt + h_0(T_s^0 - T_h)}, \\ T_s(t) = \frac{\int_{t_0}^t Q_0(t) dt + h_0(T_s^0 - T_h)}{K(t-t_0) + h_0^2(T_s^0 - T_h)} \left[\int_{t_0}^t Q_0(t) dt + h_0(T_s^0 - T_h) \right] + T_h. \end{cases} \quad (5)$$

В (1)–(5): t – время; z – декартова ось координат, направленная вертикально вниз; h – толщина ВКС; T_s – температура в ВКС; Q_0 – поток тепла на поверхности моря; Q_h – поток тепла на нижней границе ВКС при $z = h-0$; Q_{h+0} – поток тепла при $z = h+0$; T_h – температура соответственно при $z = h+0$; G – генерация турбулентной энергии; D – диссипация турбулентной энергии; g – ускорение свободного падения; α – коэффициент термического расширения.

Рассмотренная модель ВКС описывает суточный ход температуры и толщины ВКС, обусловленные суточным ходом потока тепла на поверхности моря. Она хорошо воспроизводит суточные колебания температуры и толщины ВКС при различных скоростях ветра, а также позволяет исследовать зависимость A от потока тепла и скорости ветра. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследования A по данным сканера SEVIRI. Также расчеты в рамках модели позволили выявить изменчивость толщины ВКС при совместном действии двух механизмов, оказывающих противоположное воздействие (потока тепла и скорости ветра), определяющих эти характеристики.

В подразделе 3.2 исследовано влияние скорости ветра и вертикальной компоненты скорости течений на A и толщину ВКС на основе численных экспериментов с использованием модели POM. В подразделе представлено краткое описание одномерной гидродинамической модели. Одномерная гидродинамическая модель построена на основе одномерной версии модели океанической циркуляции POM (Mellor, 2001). В работе (Oguz et al., 1996) подобная версия была адаптирована для Черного моря, однако она не учитывала влияния вертикальных движений на динамику верхнего квазиоднородного слоя (ВКС). Без учета вертикальной компоненты скорости течений толщина ВКС непрерывно растет, что приводит к проникновению зимней конвекции до дна бассейна (Denman, 1973; Кубрякова и др., 2011, 2013а). Для получения устойчивого периодического решения был включен механизм поддержания плотностной стратификации (Кубрякова, 2019). Для того чтобы учесть влияние вертикальных движений, в одномерную гидродинамическую модель добавлены слагаемые с вертикальной составляющей скорости течений (Кубрякова, 2019). В работе с помощью модели POM был выполнен расчет временного хода температуры для горизонтов 0–410 м. В различных экспериментах использовались нерегулярные по вертикали сетки: сетка $\Delta z = 0,5$ м от 0 до 50 м; $\Delta z = 2$ м от 50 до 150 м; $\Delta z = 20$ м от 150 до 410 м и сетка $\Delta z = 0,05$ м от 0 до 5 м; $\Delta z = 0,2$ м от 5 до 10 м; $\Delta z = 1$ м от 10 до 30 м; $\Delta z = 2$ м от 30 до 50 м; $\Delta z = 5$ м от 50 до 110 м; $\Delta z = 20$ м от 110 до 410 м. Сезонная изменчивость атмосферных параметров задавалась по данным реанализа ERA-40, проведенного в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с временной

дискретностью 6 ч (Uppala, et al., 2005). Поля атмосферных параметров были осреднены за 1971–2001 гг. по акватории центральной части бассейна. В качестве массива коротковолнового излучения был использован массив реанализа Era5 с временной дискретностью 1 час за 2009 год в центральной точке бассейна Черного моря с координатами 43° с.ш., 34° в.д. В результате численных экспериментов по исследованию влияния вертикальной компоненты скорости течений были получены следующие результаты. При положительной вертикальной компоненте скорости течений происходит подъем термоклина к поверхности, стратификация становится более выраженной, соответственно, турбулентный поток тепла в глубину ослабевает, в результате поверхностный слой нагревается более интенсивно. Когда вертикальная компонента скорости течений направлена от поверхности, происходит опускание термоклина, соответственно, объем прогреваемых вод увеличивается, стратификация ослабевает, величина амплитуды суточного хода не так велика. Следует отметить, что поскольку вертикальная компонента скорости течений оказывает воздействие на амплитуду суточного хода температуры, то неоднородности в распределении вертикальной компоненты скорости течений являются фактором, который способствует формированию тонких структур в зонах интенсивного дневного прогрева. В *подразделе 3.3* представлены результаты численного моделирования событий экстремального дневного прогрева. Изменение k_1 (коэффициент поглощения в оптическом диапазоне) практически не влияет на амплитуду суточного хода в верхнем слое 1–2 м. В то же время, k_1 более существенно влияет на амплитуду изменчивости температуры в нижних слоях. Выраженная зависимость A наблюдается от параметра R . При увеличении доли ИК радиации, A значительно возрастает при малых значениях толщины ВКС, достигая 6°C при $R=10\text{--}20\%$ для малых значений глубины перемешанного слоя. Следует отметить, что R —относительно постоянная величина, и её вариации малы. Изменения k_2 (коэффициент поглощения в ИК диапазоне) оказывают наиболее существенное влияние на температуру в верхнем слое. Однако амплитуды величиной $7\text{--}10^\circ\text{C}$ могут наблюдаться лишь при очень малых величинах ВКС, составляющих всего 10–20 см. Для воспроизведения интенсивного дневного прогрева необходимо использовать другие значения k_2 . При заданных параметрах в слое 20 см прогрев 7°C достигается при значении $k_2=8$. Эта величина больше, чем используемая стандартно 5, но тем не менее, значительно меньше реальных оценок среднего коэффициента поглощения в ИК-диапазоне.

Однако при стандартных параметрах расчета турбулентности даже при отсутствии ветра A составляют всего $0,5\text{--}1,5^\circ\text{C}$, а изменение k_2 слабо влияет на прогрев. При искусственном задании $K_H=0$ м²/с амплитуда суточного хода возрастает, однако ее величина не превышает 3°C . При уменьшении фоновой вязкости от 10^{-5} до 10^{-6} м²/с (при $K_H=0$ м²/с) модель успешно воспроизводит амплитуды прогрева $6\text{--}7^\circ\text{C}$. При уменьшении параметров Меллора-Ямады в 10–100 раз также были достигнуты величины суточного хода $6\text{--}7^\circ\text{C}$ на второй и третий день расчета. Однако с такими параметрами модели Меллора-Ямады сезонный ход температуры не воспроизводился, точно также как и с величиной $K_H=0$ м²/с. Модель Меллора-Ямады значительно

переоценивает интенсивность турбулентности в тонком ВКС. Таким образом, для параметризации и правильного описания изменчивости температуры верхнего слоя нужны усовершенствованные схемы турбулентности, по крайней мере у поверхности моря.

В Разделе 4 исследованы характеристики и изменчивость термического скин-слоя Черного моря на основе данных сканера SEVIRI и термопрофилирующих дрейфующих буев. В подразделе 4.1 выполнена оценка перепада температуры dT в скин-слое. Величины dT принимают в среднем, значения от $-0,4$ до $+0,4^\circ\text{C}$. Значения $dT < 0$ считались проявлением существования скин-слоя. Исследована зависимость dT от различных факторов: ветра, величины полного потока тепла и потока скрытого тепла, относительной влажности, температуры воздуха, разности температуры воздуха и ТПМ, рассмотрена сезонная и суточная изменчивость dT в различных диапазонах скоростей ветра (Рисунок 3, $a - \delta$). Определены следующие условия проявления и существования скин-слоя: низкие скорости ветра, теплый период года (полный поток тепла направлен в океан), высокая влажность воздуха, малая интенсивность испарения (малый поток скрытого тепла)

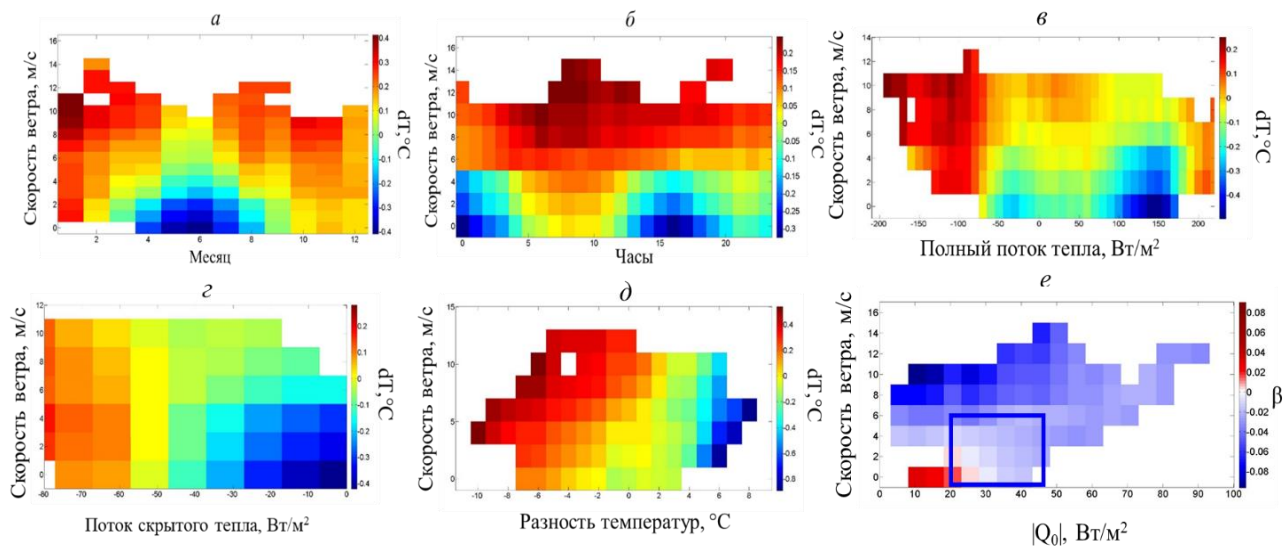


Рисунок 3 – Диаграммы зависимости dT от скорости ветра в различные месяцы (по всем дрейфтерам) (a); диаграмма распределения разницы показаний dT от скорости ветра в различные часы суток для мая-августа (время по Гринвичу) (b); диаграмма зависимости dT от полного потока тепла и скорости ветра (c); диаграмма зависимости dT от величины потока скрытого тепла и скорости ветра (d); диаграмма зависимости dT от разности температуры воздуха и ТПМ и ветра (e); диаграмма зависимости β от температуры воздуха и абсолютных значений Q_0 (f)

В течение суток в теплый период скин-слой наиболее выражен во второй половине дня, ночью и ранним утром из-за пониженных скоростей ветра. Наличие влияния потоков скрытого тепла и относительной влажности на dT свидетельствует о важной роли влагообмена между океаном и атмосферой (процессы испарения и выпадения осадков), который, в частности, влияет на соленость вод. Определено, что

при малых скоростях ветра важнейшее влияние, кроме потока скрытого тепла, на скин-слой оказывает поток длинноволнового излучения: при высоких значениях потоков скрытого тепла и длинноволнового излучения скин-слой разрушается, предположительно, под действием конвекции.

В *подразделе 4.2* выполнена оценка условий применимости теории скин-слоя Саундерса для района Черного моря на основе данных сканера SEVIRI и термопрофилирующих дрейфующих буев. Модель скин-слоя Саундерса (Saunders, 1967) для района Черного моря применима в ограниченном интервале условий: при скоростях ветра до 6–7 м/с и абсолютных значениях Q_0 , равных 20–50 Вт/м² (Рисунок 3, е).

В **Разделе 5** рассмотрен суточный ход температуры вод Черного моря на различных горизонтах и его связь со стратификацией по результатам численного моделирования. В *подразделе 5.1* представлено описание результатов расчета, полученных с использованием трехмерной гидродинамической модели NEMO. В *подразделе 5.2* выполнен сравнительный анализ данных дистанционного зондирования и результатов расчета с использованием модели NEMO, который показал, что NEMO достаточно хорошо воспроизводит пространственные особенности распределения температуры, сезонную изменчивость, а также суточный и средний суточный ход температуры. Отмечено, что амплитуды суточного хода температуры для верхнего слоя по результатам расчета модели несколько ниже, чем полученные по спутниковым данным.

В *подразделе 5.3* исследовано вертикальное распределение суточных колебаний температуры, выполнен спектральный анализ вертикального распределения температуры верхнего слоя вод Черного моря (Рисунок 4). Определено, что наиболее интенсивные суточные колебания имеют место в теплый период года в верхнем слое 7–10 м, которым они и ограничены. В холодный период года интенсивность суточных колебаний ниже, однако, глубина проникновения суточного хода температуры достигает 35–45 м. Такое распределение связано с особенностями стратификации вод для каждого из этих периодов.

В *подразделах 5.4 и 5.5* представлены результаты исследования особенностей вертикального распределения температуры верхнего слоя вод Черного моря во время событий значительного дневного прогрева и пространственного распределения спектральной энергии суточных колебаний. Получено, что нижняя граница, до которой обнаруживаются суточные колебания температуры, практически полностью совпадает с верхней границей скачка плотности.

В теплый период года суточные колебания температуры наиболее выражены и затрагивают лишь приповерхностный тонкий слой, при этом для мелководной прибрежной зоны суточные колебания проникают практически до дна во все сезоны года. В глубоководной части бассейна в зимний период эти колебания проявляются на горизонте 30–45 м. В зонах даунвеллинга в холодный период года суточные колебания способны проникать в слои до 50 м.

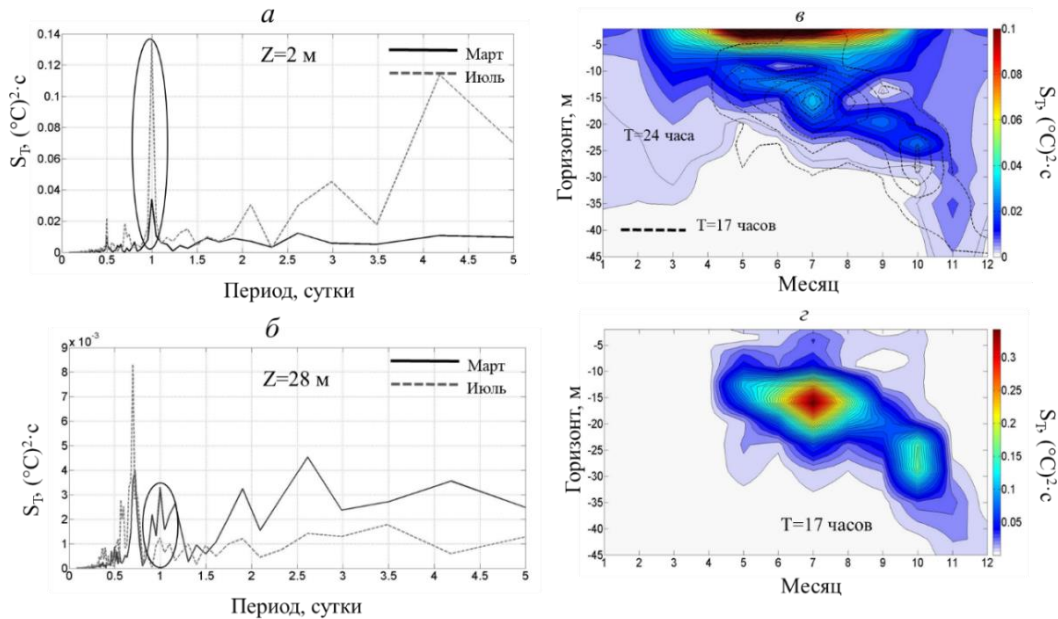


Рисунок 4 – Энергетический спектр температуры на горизонте 2 м в точке 43° с.ш., 34° в.д., (а); энергетический спектр температуры на горизонте 28 м в точке 43° с.ш., 34° в.д. (б); черная линия для марта, серая пунктирная линии для июня, эллипсом обведены пики, соответствующие периоду 1 сутки; диаграмма распределения средних за месяц вертикальных профилей энергии в точке 43° с.ш., 34° в.д., для колебаний температуры с периодом 24 часа (в), пунктирной линией нанесено положение максимальных значений спектральной энергии для колебаний температуры с периодом 17 часов; диаграмма распределения средних за месяц вертикальных профилей энергии в точке 43° с.ш., 34° в.д., для колебаний температуры с периодом 17 часов (г)

В подразделе 5.6 проведено исследование суточной изменчивости стратификации вод в различные сезоны года. По результатам расчета с использованием модели NEMO для всех сезонов года существует средний суточный ход толщины ВКС, который является проявлением локальных единичных случаев подъема ВКС в часы интенсивного дневного прогрева. Минимальные горизонты залегания ВКС, в общем случае, приходятся на середину дня – послеполуденные часы, когда имеет место дневной прогрев. Анализ вертикального распределения частоты Брента-Вяйсяля N в Черном море по данным NEMO в различные сезоны года позволил определить наличие суточной изменчивости стратификации вод в различные сезоны года. Суточная изменчивость, которая проявляется в минимальных значениях N в ночные и утренние часы (ночная конвекция) и максимальных значениях в послеполуденные часы (дневной прогрев и образование дневного термоклина), наиболее выражен на горизонтах от поверхности до 5–7 м для периода с января по сентябрь. В осенне-зимний период суточный ход стратификации практически отсутствует.

Подраздел 5.7 посвящен исследованию влияния суточного хода температуры на прогрев глубинных слоев вод и толщину ВКС по результатам расчета с использованием одномерной гидродинамической модели РОМ (Рисунок 5).

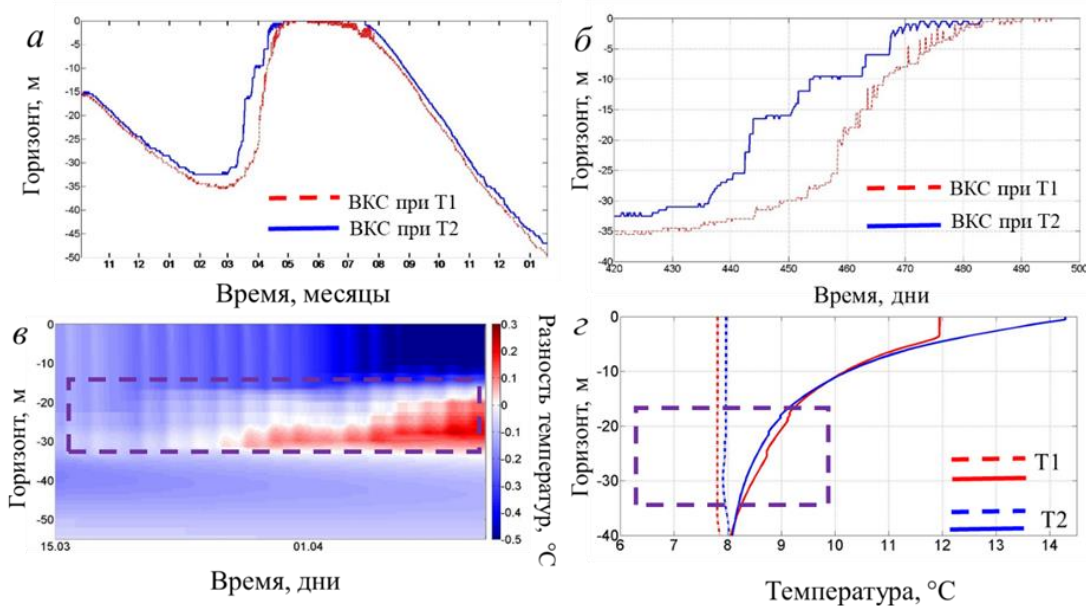


Рисунок 5 – Временной ход толщины ВКС по результатам расчетов с учетом суточного хода температуры (красная пунктирная линия) и без учета суточного хода температуры (синяя сплошная линия) для второго года расчета (а); временной ход толщины ВКС по расчетам с учетом суточного хода температуры (красная пунктирная линия) и без учета суточного хода температуры (синяя сплошная линия) для периода с февраля по май второго года расчета (б); разностная диаграмма массивов температуры T1 и T2 для периода с 15 марта по 20 апреля второго года расчета (в); профили температуры: обозначенные пунктирными линиями – за 15 марта в 00.00, красный – для T1, синий – для T2; профили, обозначенные сплошными линиями – за 20 апреля в 23.00, красный – для T1, синий – для T2; фиолетовым пунктирным прямоугольником выделен рассматриваемый слой 15–30 м (г)

Определено, что в теплый период года в ходе ночной конвекции происходит ослабление стратификации, дальнейшее ветровое перемешивание способствует опусканию теплых вод, происходит перераспределение тепла в нижних слоях, что приводит к прогреву этих более глубоких слоев вод. Ночная конвекция также способствует увеличению толщины ВКС. В холодный период года ночная конвекция приводит к более интенсивному остыванию холодного промежуточного слоя.

В **Заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию суточных колебаний температуры поверхностного слоя вод Черного моря и их вклада в изменчивость вертикальной термической структуры.

Представленные в работе результаты демонстрируют важность учета суточного хода температуры при исследовании различных процессов в Черном море. Продемонстрировано успешное использование данных с высоким временным разрешением сканера на геостационарной орбите SEVIRI для исследования суточного хода температуры и событий дневного прогрева в Черном море. Автором впервые получены и исследованы количественные зависимости термических характеристик скин-слоя от различных гидрометеорологических факторов для района Черного моря. В работе установлены особенности суточного хода перепада температуры в скин-слое. Оценены условия существования выраженного скин-слоя, а также условия, в которых применима теория скин-слоя Саундерса для Черного моря. Была определена роль суточного хода температуры в перераспределении потоков тепла в толще вод, прогреве глубинных слоев, формировании сезонного термоклина, стратификации и влиянии на толщину ВКС.

Основные научные результаты исследования могут быть сформулированы следующим образом.

1. На основе данных с высоким временным разрешением сканера SEVIRI и термодрифтеров впервые исследованы особенности суточного хода температуры Черного моря в различные сезоны года. Получено, что в верхнем слое вод суточный ход температуры наиболее выражен в весенне-летний период с апреля по июль. В течение суток прогрев верхнего слоя в среднем наблюдается с 6 часов утра до 17 часов, а охлаждение с 19 часов до 4 часов следующего утра. Отдельной особенностью среднего суточного хода температуры является то, что в холодный период года температура в верхнем слое несколько ниже, чем в нижележащих слоях на протяжении всех суток за исключением часов дневного прогрева.

2. Максимальные амплитуды суточного хода температуры A имеют место в весенне-летний период, когда температура воздуха достигает $+14^{\circ}\text{C}$ и выше, при максимальных значениях коротковолнового излучения, когда полный поток тепла направлен в океан (т.е. положительный) при скоростях ветра до 5–6 м/с. События значительного дневного прогрева имеют место во все сезоны года, но наибольшее их количество и максимальные значения A приходятся на весенне-летний период и могут достигать $4,5^{\circ}\text{C}$ по данным термодрифтеров, и 5– $5,5^{\circ}\text{C}$, а в отдельных случаях и 7°C , по данным SEVIRI. События значительного и экстремального дневного прогрева формируются в условиях малой облачности при низких скоростях ветра до 4–5 м/с. Зоны прогрева неоднородны по своей структуре, что непосредственно связано с особенностями распределения вертикальной компоненты скорости течений. При положительном направлении вертикальной компоненты скорости течений A примерно в 2 раза выше, чем при ее отрицательном направлении.

3. Для достижения амплитуд экстремального прогрева толщина ВКС должна не превышать нескольких сантиметров. Для воспроизведения этих событий в численных моделях необходима коррекция параметров поглощения ИК-излучения и усовершенствование схемы турбулентности у поверхности моря.

4. Исследована взаимосвязь перепада температуры в скин-слое dT от различных гидрометеорологических факторов. Определены следующие условия проявления и существования скин-слоя: низкие скорости ветра, теплый период года (полный поток тепла направлен в океан), высокая влажность воздуха, малая интенсивность испарения (малый поток скрытого тепла), в течение суток в теплый период скин-слой наиболее выражен во второй половине дня, ночью и ранним утром из-за пониженных скоростей ветра. Проведена оценка условий применимости модели скин-слоя Саундерса для района Черного моря. Модель скин-слоя Саундерса для района Черного моря применима в ограниченном интервале условий: при скоростях ветра до 6–7 м/с и абсолютных значениях Q_0 равных 20–50 Вт/м².

5. Наиболее интенсивные суточные колебания температуры проявляются в верхнем пятиметровом – семиметровом слое в теплый период года. В холодный период они менее интенсивны, но проникают в слои до 50 м. Нижняя граница, до которой обнаруживаются суточные колебания температуры, зависит от положения верхней границы скачка плотности, которая влияет на пространственные особенности проникновения суточных колебаний.

6. Получено, что для всех сезонов года существует средний суточный ход толщины ВКС, который является проявлением локальных случаев подъема нижней границы ВКС в часы интенсивного дневного прогрева. Также имеет место наличие суточной изменчивости стратификации вод в различные сезоны года, которая проявляется в минимальных значениях частоты Брента-Вяйсяля в ночные и утренние часы (ночная конвекция) и максимальных значениях в послеполуденные часы (дневной прогрев и образование дневного термоклина) наиболее выражен на горизонтах от поверхности до 5–7 м для периода с января по сентябрь. В осенне-зимний период суточная изменчивость стратификации практически отсутствует.

7. На основе численных экспериментов с использованием модели РОМ определено, что изменения характеристик вертикального обмена, связанных с суточным ходом температуры, влияют на термическую структуру Черного моря в слое 0–50 м – во время ослабления стратификации при ночной конвекции в результате ветрового перемешивания прогретые днем воды опускаются, усиливая проникновение тепла в глубинные слои в период весеннего прогрева.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

1. **Rubakina V.A.** Seasonal Variability of the Diurnal Cycle of the Black Sea Surface Temperature from the SEVIRI Satellite Measurements / V.A. Rubakina, A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny // *Physical Oceanography*, [e-journal]. – 2019. – V. 26, № 2. – P. 157–169. doi: 10.22449/1573-160X-2019-2-157-169. (Рубакина В.А. Сезонная изменчивость суточного хода температуры поверхностного слоя Черного моря по данным сканера SEVIRI / В.А. Рубакина, А.А. Кубряков, С.В. Станичный // *Морской гидрофизический журнал*. – 2019. – Т. 35, № 2. – С. 171–184. – doi: 10.22449/0233-7584-2019-2-171-184).

2. **Рубакина В.А.** Сезонный и суточный ход температуры вод Черного моря по данным термопрофилирующих дрейфующих буев / В.А. Рубакина, А.А. Кубряков, С.В. Станичный // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2019. – Т. 16, № 5. – С. 268–281. – doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-268-281.

3. **Rubakina V.A.** Seasonal and Diurnal Variability of the Thermal Skin Layer Characteristics Based on a Comparison of Satellite Measurements by SEVIRI and Data from Temperature-Profiling Drifters / V.A. Rubakina, A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2021. – V. 57, № 9. – P. 950–961. – doi: 10.1134/S0001433821090607. (Рубакина В.А. Сезонная и суточная изменчивость характеристик термического скин-слоя на основе сопоставления спутниковых измерений SEVIRI и данных термопрофилирующих буев / В.А. Рубакина, А.А. Кубряков, С.В. Станичный // *Исследования Земли из космоса*. – 2021. – № 3. – С. 30–44. – doi: 10.31857/S020596142102007X).

4. **Rubakina V.A.** Properties of the Vertical Distribution of Diurnal Temperature Variations in Different Seasons in the Black Sea Based on the NEMO Model Data / V.A. Rubakina, A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny, A.I. Miziuk // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2022. – V. 58, № 1. – P. 54–67. – doi: 10.1134/S000143382201011X. (Рубакина В.А. Особенности вертикального распределения суточного хода температуры в различные сезоны в Черном море на основе данных модели NEMO / В.А. Рубакина, А.А. Кубряков, С.В. Станичный, А.И. Мизюк // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. – 2022. – № 1. – С. 63–78. – doi: 10.31857/S0002351522010114).

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Рубакиной Валентины Александровны

Подписано к печати 23.12.2022 г.	Формат бумаги 60×84 1/16
Объем 0,9 п.л.	Заказ № 1173
	Тираж 100 экз.

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