

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук
член-корреспондент РАН,
доктор географических наук



А.В. Соков

«03» марта 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук»
на диссертационную работу

Рубакиной Валентины Александровны

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

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.6.17 – океанология

Диссертационная работа В.А. Рубакиной выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт Российской академии наук» (ФГБУН ФИЦ МГИ), г. Севастополь. В работе В.А. Рубакиной представлены результаты исследования суточных колебаний температуры верхнего слоя Черного моря и рассмотрен вклад этих колебаний в изменчивость вертикальной термической структуры вод.

На отзыв ведущей организации были представлены диссертация (объемом 201 страницы) и автореферат (объемом 24 страницы). Текст диссертации состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников из 160 наименований, в том числе 102 на английском языке.

Во **Введении** работы обсуждены актуальность и степень изученности темы, определены цели и задачи работы, описаны методы исследования, обоснована научная новизна и сформулированы положения, выносимые на защиту. Представлены аргументы для обоснования теоретической и практической значимости диссертационного исследования, а также даны сведения о личном

вкладе автора в получение результатов исследования и об апробации этих результатов.

В **Разделе 1** рассмотрены подходы к исследованию суточного хода температуры поверхностного слоя морских вод. Представлен литературный обзор работ, посвященных изучению суточных колебаний температуры в различных районах Мирового океана, в том числе в Черном море, и методам исследования изменчивости термохалинных полей в суточном цикле. Рассматривается вопрос о сопоставимости спутниковых и контактных данных о температуре вод, а также важная проблема параметризации термического скин-слоя и его влияния на репрезентативность спутниковых данных. Отмечено, что помимо контактных и спутниковых измерений, современные численные гидродинамические модели также дают возможность исследовать пространственную изменчивость суточных колебаний температуры и их взаимосвязь с вертикальной термической структурой вод, толщиной верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и плотностной стратификацией.

Раздел 2 посвящен изучению суточного хода температуры поверхностного слоя Черного моря на основе натурных измерений термодрифтеров и данных дистанционного зондирования с высоким временным разрешением сканера SEVIRI. Исследованы сезонные особенности суточного хода температуры на различных горизонтах, выполнен сравнительный анализ дистанционно полученных и контактных данных. Также приведены результаты подробного исследования событий экстремального дневного прогрева на основе данных SEVIRI и дрифтеров, выявлены условия формирования таких аномальных событий.

В **Разделе 3** представлено исследование зависимости амплитуды суточного хода температуры поверхностного слоя моря от различных гидрометеорологических факторов на основе результатов средствами математического моделирования. На основе расчетов с использованием полуаналитической интегральной одномерной модели ВКС рассмотрены связи амплитуды суточного хода температуры моря с полем ветра и потоков тепла на поверхности. На основе результатов численного моделирования с использованием одномерной гидродинамической модели POM установлена взаимосвязь амплитуды суточного хода температуры с характеристиками ветрового форсинга, вертикальной компонентой скорости течений и толщиной ВКС. В этом же разделе приведены также результаты моделирования событий экстремального дневного прогрева с использованием модели POM.

В **Разделе 4** на основе информации со спутникового сканера SEVIRI и дрифтеров исследованы характеристики термического скин-слоя Черного моря

и его изменчивость. Систематизированы данные по величине перепада температуры в скин-слое, рассмотрена его зависимость от формирующих гидрометеорологических факторов. Также в этом разделе выполнена оценка применимости теории скин-слоя Саундерса для условий Черного моря.

Раздел 5 посвящен численным расчетам с использованием гидродинамических моделей NEMO и POM. Рассмотрены суточный ход температуры вод Черного моря на различных горизонтах и его связь с фоновой стратификацией. Выполнен сравнительный анализ данных SEVIRI и результатов расчетов с использованием NEMO. Проведено исследование суточных колебаний температуры на различных глубинах, в том числе методами спектрального анализа, дана оценка влияния суточного хода температуры на стратификацию приповерхностных вод Черного моря в разные сезоны года. Рассмотрено влияние суточного хода температуры на прогрев более глубоких слоев вод и толщину ВКС по результатам расчетов с использованием одномерной версии модели POM.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы, сформулированы выводы по каждому разделу и общие выводы из выполненного исследования.

Актуальность диссертационного исследования. Температура поверхностного слоя моря является важнейшей режимной характеристикой состояния различных районов Мирового океана и Черного моря в частности, оказывающей непосредственное влияние на климат и функционирование экосистемы Земли. Суточный ход температуры приповерхностного слоя вод является одним из факторов, определяющих такие процессы, как турбулентный обмен теплом, импульсом и массой (испарение) между океаном и атмосферой, формирование стратификации вод, модуляция полей ветра (особенно в прибрежной зоне) и облачности, и многие другие. Известно, что пренебрежение суточной изменчивостью температуры поверхности моря (как и суточным ходом температуры воздуха) – например, использование среднесуточных значений при расчетах на более длительные сроки – может приводить к существенным систематическим ошибкам в оценках теплообмена между океаном и атмосферой. Таким образом, аккуратный учет процессов в суточном цикле необходим для корректного моделирования системы «океан-атмосфера», в том числе в целях оперативного прогнозирования.

Вместе с этим, исследованию суточного хода температуры в Черном море были посвящены лишь относительно небольшое число работ. С появлением современных приборов и средств, позволяющих на регулярной основе получать данные о температуре в поверхностном слое моря с достаточно высоким временным разрешением (дрифтеры, сканеры на геостационарных орбитах, а

также современные численные модели), появились новые возможности для подробного изучения распределений и свойств суточных колебаний температуры и их взаимосвязи с формирующими гидрометеорологическими условиями. Таким образом, тема диссертационного исследования Рубакиной В.А. является актуальной в общем контексте задач современной океанологии.

Теоретическая и практическая значимость работы. В работе продемонстрированы перспективные возможности использования данных с высоким временным разрешением сканеров на геостационарных орбитах для исследований в Черном море. Представленные в диссертационной работе результаты исследования влияния различных гидрометеорологических факторов на характеристики скин-слоя в Черном море и полученные зависимости и параметризации могут быть использованы в численных моделях, а также для корректировки данных дистанционного зондирования. Установлены условия, способствующие формированию событий экстремального дневного прогрева. Определены условия применимости модели Саундерса для скин-слоя в Черном море.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

С использованием высокочастотных данных сканера SEVIRI и данных термодрифтеров впервые выполнен статистический анализ величин дневного прогрева за многолетний период, впервые определены условия формирования событий аномального дневного прогрева с амплитудой до 5°C и даже более. Насколько нам известно, ранее о подобных событиях в научной литературе сообщений не было. Впервые получены количественные зависимости величины перепада температуры в скин-слое от различных гидрометеорологических факторов для района Черного моря, исследована суточная изменчивость скачка температуры в скин-слое. Определены условия применимости теории скин-слоя Саундерса для Черного моря. Получена зависимость амплитуды суточного хода температуры поверхностного слоя моря от скорости ветра, температуры воздуха и потоков тепла на поверхности моря для различных месяцев года. Получены пространственные и сезонные распределения суточных колебаний температуры на различных горизонтах, оценены глубина проникновения суточных колебаний, их интенсивность, связь с вертикальной компонентой скорости течений. Впервые количественно оценен вклад суточного хода температуры верхнего слоя в прогрев нижележащих слоев в весенний период.

Личный вклад автора. Соискатель участвовала в планировании исследований, получении и обработке данных, постановке и проведении численных экспериментов, а также интерпретации полученных результатов на всех этапах выполнения работы. Автором лично выполнен сравнительный анализ данных дистанционного зондирования и измерений термодрифтеров, а также

валидация результатов расчетов с использованием модели NEMO по спутниковым данным. Лично соискателем проведено исследование пространственных и сезонных особенностей суточного хода температуры, их связей с формирующими гидрометеорологическими факторами, выполнены расчеты с использованием модели РОМ. Вклад соискателя был определяющим при подготовке публикаций. Автор также представляла результаты работы на всероссийских и международных конференциях и семинарах.

Достоверность научных результатов подтверждается проведенной многосторонней кросс-валидацией на основе контактных данных, спутниковых измерений и результатов численного моделирования. 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 натурных измерений за многолетний период. Численные эксперименты проводились с использованием известных и получивших международное признание гидродинамических моделей, валидация и апробация которых была ранее выполнена в многочисленных отечественных и зарубежных работах.

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842.

В диссертации имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, а также на научные публикации с участием соискателя.

Результаты работы опубликованы (в соавторстве) в 4 научных статьях в журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве высшего образования и науки РФ, а также в 16 тезисах докладов на научных конференциях, входящих в базу данных РИНЦ. Публикации по результатам диссертационной работы соответствуют требованиям ВАК. Материалы диссертации прошли апробацию на 14 конференциях всероссийского и международного уровня.

Вместе с этим, по содержанию работы можно высказать некоторые критические **замечания**.

1. При сопоставлении амплитуд суточного хода, оцененных по данным термодрифтеров и спутникового сканера SEVERI, необходимо иметь в виду, что речь идёт о принципиально различных типах данных. Автор работы сама на это указывает. Но дело тут не только в наличии скин-слоя, которому автор уделяет основное внимание. Данные термодрифтеров относятся к фиксированному элементу воды, который перемещается вместе с дрифтером, данные спутника – к

фиксированной точке пространства (конкретному пикселю). Поэтому дрейфтерные данные по определению не содержат изменений температуры, связанных с адвекцией, а спутниковые данные их содержат. Возможно, этим и объясняется тот факт, что амплитуды аномально интенсивных событий дневного прогрева оказались значительно более высокими по данным SEVERI, чем по данным термодрейфтеров. Поскольку эти амплитуды рассчитывались, как простая разность между суточными максимумом и минимумом температуры (а не посредством, например, выделения суточной гармоника), вполне можно представить себе ситуацию, когда через рассматриваемую в спутниковых измерениях точку в течение суток проходит какая-то структура, связанная с горизонтальным градиентом температуры, и тогда временная изменчивость в суточных масштабах окажется «смешанной» с пространственной изменчивостью. Конечно, подобные эффекты вряд ли способны существенно повлиять на основные выводы диссертационной работы, однако их следовало бы, как минимум, внимательно обсудить и, по возможности, оценить.

2. Интегральные одномерные модели верхнего квазиоднородного слоя, представленные в Разделе 3, являются в значительной степени идеализированными, и их применимость для воспроизведения изменчивости температуры в суточном цикле не во всех отношениях очевидна. Так, модель, описанная в параграфе 3.1 (по существу, это хорошо известная модель ВКС Крауса-Тернера) не учитывает объемного поглощения солнечного тепла толщей верхнего слоя – коротковолновая радиация входит в рассмотрение только на верхней границе. Такое допущение может быть вполне приемлемым при решении многих задач, но для корректного описания именно суточного хода температуры, который обычно проявляется, убывая по вертикальной координате, в эвфотическом верхнем слое до глубины порядка единиц или первых одного-двух десятков метров, учёт прямого поглощения солнечной радиации в водной толще (а не только на поверхности) может быть весьма существенным. Отметим, что несколько ниже в параграфе 3.3.1 автор делает оценки с учётом этого фактора. Но при этом, насколько это можно понять из текста диссертации (уравнение 3.45 на с. 104 и дальнейшие выкладки), наоборот, не учитывается турбулентный поток тепла на нижней границе ВКС – или в тексте не объяснено, как он рассчитывается, в частности, откуда берется значение коэффициента турбулентной диффузии $K_H(h)$.

3. В продолжение сказанного выше можно отметить, что разбиение спектра солнечной радиации на видимую и инфракрасную части (формула 3.45 на с. 102) является слишком грубым (попутное редакционное замечание: в нумерации формул допущена ошибка, вследствие которой под одним и тем же номером (3.45) фигурируют два совершенно разных уравнения - одно на с. 102, другое на с. 104,

что создает некоторую путаницу). Обычно в подобных расчетах используется набор более узких спектральных интервалов, каждый со своим коэффициентом поглощения. Наконец, для аппроксимации потока тепла на поверхности автор использует гармоническую функцию суточного периода. Между тем, в реальных условиях солнечная радиация ведет себя иначе: ее временной ход действительно близок к тригонометрической зависимости от высоты солнца в светлое время суток (при отсутствии облачности), но в ночное время она постоянно равна нулю – то есть нижняя половина синусоиды «вырезается». Очевидно, что этот факт имеет значение при формировании суточного хода температуры моря. Заметим, что точные решения задачи можно получить и для такой более сложной зависимости от времени, если представить ее в виде ряда Фурье и рассматривать не только суточную, но и высшие гармоники.

4. Далее следуют несколько замечаний редакционного характера. По списку литературы в диссертации и автореферате: непонятно, почему при цитировании своих собственных (и некоторых других) публикаций автор предпочитает ссылаться на их английские переводы, а не на русскоязычные оригиналы. По тексту диссертации: не все использованные в расчетах численные значения переменных указаны, и даже не все обозначения в формулах должным образом определены в тексте. Для коэффициентов поглощения солнечной радиации приведены численные значения, но не указаны единицы измерения (м^{-1} ?). В тексте встречаются довольно большое количество опечаток.

Отмеченные недостатки, однако, не снижают общую положительную оценку выполненной работы.

Заключение. Диссертация «Суточные колебания температуры верхнего слоя Черного моря и их вклад в изменчивость вертикальной термической структуры вод» является завершенным научным исследованием, полностью соответствующим требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Рубакина Валентина Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 – океанология.

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен и утвержден на заседании Ученого совета физического направления Института океанологии РАН (протокол №6 от 3 марта 2023 г.).

Отзыв составили

Заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, член-корреспондент РАН, доктор географических наук (специальность 11.00.08 – Океанология)

117997, Москва, Нахимовский пр-т, д.36

Телефон +79169326452

E-mail: peter@ocean.ru

Петр Олегович Завьялов

Ведущий научный сотрудник Лаборатории взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, доктор физико-математических наук (специальность 25.00.28 – Океанология)

117997, Москва, Нахимовский пр-т, д.36

Телефон +79165798128

E-mail: osadchiev@ocean.ru

Александр Александрович Осадчиев

Сведения о ведущей организации:

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

Нахимовский просп., д. 36 г.

г. Москва, 117997

Телефон: +7 (499) 124-59-96, +7 (499) 124-61-49

E-mail: office@ocean.ru

Подписи сотрудников Завьялова Петра Олеговича и Осадчиева Александра Александровича заверяю.

Заместитель ученого секретаря Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, кандидат философских наук



М.А. Артемьева

2023 г.