

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Лишаева Павла Николаевича «Восстановление гидрофизических полей Черного моря на основе использования данных альтиметрии и ограниченных контактных измерений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 – Океанология

В силу затратности контактных измерений проблема обеспечения океанологических исследований численными данными является традиционно актуальной, и особенно это характерно для последних десятилетий, когда сокращается количество судовых экспедиций. При этом в силу относительно компактных характерных масштабов морских динамических структур важно иметь данные соответствующего разрешения, равномерно распределенные по всей акватории исследуемого бассейна. В связи с этим, происходящее в период с 1993 г. по настоящее время снижение количества регулярных гидрологических измерений в Чёрном море значительно усложняет проведение таких исследований как ретроспективный анализ. В то же время, с конца 1992 г. для Чёрного моря становится доступным новый продукт – динамический альтиметрический уровень моря. Эти данные покрывают всю акваторию моря, но в явном виде не дают информации о подповерхностных процессах. Решением является ассимиляция спутниковых альтиметрических наблюдений совместно с данными гидрологических зондирований в вихреразрешающих моделях циркуляции, что позволяет воспроизводить особенности сезонной, межгодовой и декадной изменчивости полей как отдельных морей, так и Мирового океана в целом.

Диссертационная работа П.Н. Лишаева посвящена созданию двухступенчатого алгоритма восстановления трёхмерных полей температуры и солёности Чёрного моря по редким данным контактных измерений с привлечением спутниковой альтиметрии и получением выходных данных достаточной дискретности как по времени, так и по пространству. Для этого на первом этапе применяется оригинальный метод получения массивов псевдоизмерений на регулярной сетке с разрешением по пространству как у альтиметрических измерений, что даёт возможность проводить предварительный анализ пространственной и временной изменчивости гидрофизических полей ещё до привлечения численного моделирования. На втором этапе полученные ранее массивы псевдоизмерений используются как входные данные для ассимиляции в модели общей циркуляции вод Чёрного моря, давая в итоге более полные и согласованные с наблюдениями выходные поля.

Основное содержание диссертации состоит из введения, трёх разделов и заключения. Во **Введении** раскрываются актуальность, теоретическая и практическая значимость работы, новизна выбранной темы исследований, ставится цель – восстановить и проанализировать сезонную, межгодовую, междекадную и синоптическую изменчивости гидрофизических полей Чёрного моря за 1993–2014 гг. Формулируются конкретные задачи работы – исследовать динамику полей температуры и солёности Чёрного моря на основе совместного анализа данных гидрологических зондирований и альтиметрии; разработать алгоритм восстановления трёхмерных ежесуточных полей псевдоизмерений температуры и солёности морской воды в бароклинном слое моря на регулярной сетке за 1993–2014 гг.; усовершенствовать алгоритм адаптивной статистики для ассимиляции псевдоизмерений температуры и солёности в модели циркуляции моря; выполнить реанализ гидрофизических полей Чёрного моря с ассимиляцией трёхмерных полей псевдоизмерений температуры и солёности в модели циркуляции за 1993–2014 гг.; исследовать сезонную, межгодовую, междекадную и синоптическую изменчивости гидрофизических полей Чёрного моря за 1993–2014 гг. на основе восстановленных полей псевдоизмерений и данных реанализа. Приводятся положения, выносимые на защиту, список публикаций автора и другие необходимые сведения о диссертационной работе.

В **Разделе 1** формулируется и обосновывается алгоритм восстановления трёхмерных полей псевдоизмерений с помощью анализа нерегулярных по пространству и времени данных гидрологических измерений температуры и солёности и спутниковых альтиметрических наблюдений. В основе алгоритма лежит построение эмпирических зависимостей между среднемесячными значениями температуры и солёности в глубоководной части Чёрного моря и различными градациями альтиметрического уровня. Эта процедура выполняется автором на практике для периода 1993–2012 гг., когда количество судовых гидрологических наблюдений и зондирований буями Argo было ограничено, а для некоторых отдельных месяцев данные могли вовсе отсутствовать. Она показала распреснение вод в верхнем слое 0–50 м к концу периода 1993–2002 гг., уменьшение толщины холодного промежуточного слоя (ХПС) моря, а также позволила обосновать дальнейшее применение адиабатического приближения на глубинах более 100 м. Как результат, показано, что значения солёности и температуры в слое 100–500 м в любой градации альтиметрического уровня моря можно выразить через среднемесячные значения этих величин в невозмущённой градации, смещённые по вертикали.

Раздел 2 посвящён анализу межгодовой изменчивости гидрофизических полей Чёрного моря, полученных на основе результатов численного моделирования с использованием

модели МГИ. Было проведено два длительных численных эксперимента, для периодов 1980-1993 гг. и 1993-2012 гг., отличавшихся по характеристикам усваиваемых данных температуры и солёности.

В первом случае усваивались среднегодовые невозмущённые профили, полученные по методу из Раздела 1, применённому к данным реанализа [Кныш и др., 2011, 2012]. Получено, что среднегодовые профили температуры отслеживают холодозапас ХПС, а профили солёности отражают характерную изменчивость в постоянном галоклине. Их усвоение увеличивает количество и интенсивность антициклонов, однако интенсивность поверхностных геострофических течений в модельных антициклонах оказывается всё же ниже, чем при анализе чисто альтиметрического уровня. Согласно результатам дополнительного эксперимента на чувствительность, это может быть вызвано занижением интенсивности ветровой циркуляции в используемом в качестве внешнего форсинга массиве атмосферных данных ERA-Interim. Показано, что при выполнении реанализа по вихреразрешающей модели необходим учёт сезонной изменчивости ассимилируемых профилей невозмущённых температуры и солёности.

В рамках второго эксперимента проведён ретроспективный анализ гидрофизических полей Чёрного моря с ассимиляцией невозмущённых среднемесячных профилей температуры и солёности. Показано, что использование среднемесячных профилей позволяет уменьшить средние отклонения воспроизведённых полей температуры и солёности от наблюдений в пределах основного пикноклина и более точно воспроизвести межгодовые изменения температурной и халинной стратификации, такие как известные по данным литературы тренды солёности в слое галоклина и межгодовые колебания средней температуры в слоях до 2000 м.

В Разделе 3 проведён прогностический расчёт для получения типичных дисперсий ошибок температуры и солёности за 1993-2012 гг., и с использованием его результатов выполнен ретроспективный анализ гидрофизических полей Чёрного моря с ассимиляцией в модели МГИ трёхмерных полей псевдоизмерений методом адаптивной статистики. Результаты реанализа валидировались по отношению к контактным измерениям температуры и солёности, альтиметрическим данным по уровню моря, а также сравнивались с результатами прогностического расчёта, реанализа из Раздела 2 и стороннего реанализа [Дорофеев, Сухих, 2017]. Показаны улучшение статистических характеристик решения по солёности в слое главного галоклина и под ним и эффективность задействования псевдонаблюдений для воспроизведения моделью уровня моря. Разработана также итерационная процедура

заполнения пропусков в полях псевдоизмерений в верхнем слое моря, позволившая уточнить результаты реанализа на глубинах до 125 м.

Результаты диссертации научно обоснованны, их достоверность подтверждена путём сопоставления с данными наблюдений, они прошли апробацию при выполнении научных программ и проектов, представлены на всероссийских и международных научных конференциях и более чем подробно опубликованы в ведущих рецензируемых журналах. Новизна результатов заключается в том, что предложен оригинальный алгоритм восстановления трёхмерных ежесуточных полей псевдоизмерений температуры и солёности в Чёрном море и схожих акваториях в условиях ограниченности контактных наблюдений. Несомненным достоинством метода является простота формулирования и основанность на наглядных физических принципах (адиабатичности) без предположения о линейной корреляции аномалий термохалинных полей и уровня. Это позволяет использовать его независимо от численного моделирования общей циркуляции, что особенно актуально для случаев ограниченности вычислительных ресурсов, например в условиях выполнения анализа данных непосредственно на судовом вычислительном комплексе. С помощью метода получил также дальнейшее развитие алгоритм усвоения данных на основе адаптивной статистики.

В качестве замечаний и вопросов к диссертации можно отметить следующее:

1. Во втором абзаце с. 34 сказано, что «Отмеченная выше тенденция смещения T,S – кривых в зависимости от градации уровня характерна для зимне-весеннего сезона...», но при этом делается ссылка на Рис. 1.11 для августа.
2. В первом абзаце с. 52 говорится, что «...видна четкая корреляция между межгодовой изменчивостью завихренности и кинетической энергией...». Аналогичное утверждение есть в последнем абзаце на с. 93. На качественном уровне с этим можно согласиться, но в дальнейших исследованиях автора было бы интересно эти корреляции увидеть в количественном выражении. Более того, утверждение в предпоследнем абзаце выводов к Разделу 2 о том, что отрицательные тенденции кинетической энергии обусловлены уменьшением модуля напряжения трения ветра представляется недостаточно обоснованным, т.к. корреляции не тождественны причинным связям (для обнаружения последних есть специальные методы, например, тест Грейнджера). Здесь же на с. 52 во втором абзаце явная опечатка с двукратным упоминанием «уменьшения».

3. Несколько неточностей было допущено при описании модели МГИ: в (2.1) пропущен знак минуса после производной уровня, в (2.2) после первого члена должен стоять плюс, в обоих этих уравнениях перед бигармоническими членами должны быть минусы. В уравнениях (2.6) и (2.10) члены, связанные с потоками тепла, должны быть приведены к размерности остальных членов. Необходимо указать, какое направление для потоков тепла, соли и импульса считается положительным. Обычно в моделях выбирается направление вниз (в океан), и в этом случае в левых частях последних двух уравнений (2.10) будут минусы.
4. По общей постановке эксперимента. При использовании аномалий альтиметрического уровня не указано, относительно какой базовой величины изначально взяты эти аномалии (глобальный средний уровень океана, переменный по пространству климатологический уровень Чёрного моря или что-то ещё). Также, за какой период восстанавливались поля в разделах 1.2.3-1.2.5: 1993-2002 или 1993-2012?
5. По терминологии и обозначениям. Что понимается под словами «зимний период N-ого года»? Что такое t_z в (2.18)? В Таблице 2.1 размерность $(^{\circ}\text{C})^2$ входит в противоречие с общепринятым определением среднеквадратичного отклонения. Что понимается под упрощённым методом в Таблице 3.1?
6. При выводе уравнений метода адаптивной статистики для условий конкретной задачи реанализа Чёрного моря был сделан ряд допущений, которые не всегда чётко прописаны. Как действует оператор осреднения E (с. 101) – по какой области, временному интервалу или ансамблю реализаций? На каких пространственных масштабах псевдоизмерения предлагается считать независимыми (с. 103)?
7. По оформлению: на рисунках, состоящих из нескольких однотипных панелей (например, поле температуры за несколько дат), целесообразно делать одинаковую цветовую шкалу во всех панелях для удобства сравнения. Нет рисунка 2.10. На рисунке 2.12 что изображено на верхнем ряду панелей и что на нижнем (в левом столбце видны разные тренды у кривой 1)?
8. По списку использованных источников. Данная область науки быстро развивается, однако самая свежая сторонняя работа по ассимиляции данных наблюдений датирована 2018 годом [Сухих, Дорофеев]. На с. 82 желательна ссылка на описание данных измерений В.Н. Белокопытова и чем они, возможно, отличаются от данных измерений, использованных в остальных разделах.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, хорошо структурирована и оформлена. Приведённые замечания не умаляют полученных в ней результатов и не влияют на общую положительную оценку работы. Автореферат полноценно отражает содержание диссертации. Диссертация Лишаева Павла Николаевича «Восстановление гидрофизических полей Черного моря на основе использования данных альтиметрии и ограниченных контактных измерений» полностью соответствует специальности 1.6.17 – Океанология, удовлетворяет критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», в том числе пп. 9-14, а её автор, Лишаев Павел Николаевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 – Океанология.

Я, Константин Викторович Ушаков, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета.

Официальный оппонент,

кандидат физико-математических наук

(специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,

численные методы и комплексы программ),

старший научный сотрудник Отдела крупномасштабных

процессов и климата Федерального государственного

бюджетного учреждения науки Институт океанологии

им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Ушаков Константин

Викторович

«14» февраля 2025 г.

117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, дом 36

телефон +7(499) 124-73-94

email ushakovkv@mail.ru

Собственноручную подпись Ушакова Константина Викторовича удостоверяю

Учёный секретарь Федерального государственного

бюджетного учреждения науки Институт океанологии

им. П.П. Ширшова Российской академии наук,

кандидат философских наук



Артемьева Мария

Александровна

«14» февраля 2025 г.