

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Зеленько Александра Андреевича
**«ОПЕРАТИВНАЯ ОКЕАНОЛОГИЯ: МОДЕЛИРОВАНИЕ,
МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ
ПОЛЕЙ МИРОВОГО ОКЕАНА»,**

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Произошедшие в последние десятилетия бурное развитие систем наблюдения за состоянием океана, повышение вычислительных возможностей компьютерной техники и связанный с ним прогресс в развитии моделей общей циркуляции океана (МОЦО) открыли новые возможности для получения диагностических и прогностических оценок основных гидрофизических полей в океанах и морях. Складываются необходимые условия для создания и поддержания вычислительных комплексов для описания и прогнозирования "погоды океана" по типу метеорологических систем, действующих уже много десятилетий. Регулярная информация, получаемая с помощью подобных морских систем, имеет большую востребованность со стороны многих отраслей деятельности, связанной с морской средой. Рассматриваемые в диссертационной работе исследования и разработки относятся к этому современному направлению развития океанологии. Важность и своевременность этих исследований отражается и в проведении в 2000-е и 2010-е годы крупных международных проектов GODAE и GOV, направленных на развитие оперативной океанологии. Представленные в диссертации технологии и результаты расчетов оперативной и ретроспективной оценки состояния общей циркуляции океана, несомненно, характеризуются высокой важностью, особенно для нашей страны, поскольку являются единственными в России доведенными до практического применения. Все вышесказанное определяет **актуальность** представленной к защите работы, главной **научной целью** которой служит «исследование и разработка методов мониторинга крупномасштабной изменчивости общей циркуляции океана, а также создание оперативной информационно-вычислительной системы прогноза параметров ветрового волнения в океане и морях России.», а также отражает **новизну и практическую значимость** представленной работы.

Исследования, представленные в диссертации, охватывают ряд направлений океанологии, объединяемых общей целью создания методов и технологических схем для получения оперативных оценок состояния циркуляции океана.

В первой главе рассматриваются современные наблюдательные системы, обеспечивающие регулярное поступление информации для задач оперативной океанологии. Следует отметить комплексность выполненного анализа разных средств измерений, подразделяемых, в первую очередь, на контактные и/или спутниковые, совместно с процедурами сбора и оперативного доведения информации до центров ее обработки для диагностических и прогностических расчетов гидрофизических полей океана. Представленные в этой части диссертационной работы материалы имеют важное значение, как для

разработчиков оперативных систем обработки данных наблюдений, так и для исследований, связанных с изучением океанических процессов.

Значительная часть диссертационной работы связана с численным моделированием крупномасштабной циркуляции океана. **Во второй главе** представлен обзор современных моделей общей циркуляции океана (МОЦО) и подробно представлена модель, разработанная в 1990-е годы и развиваемая диссертантом с соавторами до недавнего времени в Гидрометцентре (МОЦО ГМЦ). Участие автора в этих работах отражено в публикациях, перечисленных в диссертации. Модель основывается на системе «примитивных» уравнений, хорошо описывающих крупномасштабную океаническую циркуляцию. Отличительной особенностью этой МОЦО является совмещение циркуляционной модели с интегральной локальной моделью верхнего перемешанного слоя океана, предназначенной для параметризации турбулентных процессов, обусловленных взаимодействием океана с атмосферой. Приложения модели для исследований крупномасштабной изменчивости океана (на масштабах в несколько раз выше радиуса деформации Россби) представлены как в диссертации, так и в цитируемых публикациях. За время, прошедшее с первой реализации МОЦО ГМЦ, произошел существенный рост доступных вычислительных ресурсов. Для их эффективного использования необходимы модификации в постановке математической задачи и изменения используемых алгоритмов её решения. К большому сожалению, в силу объективных и субъективных причин, соискателем и его коллегами было принято решение не развивать далее собственную МОЦО ГМЦ, а осуществить переход на более продвинутую зарубежную МОЦО, а именно модель NEMO, кратко описанную в разделе 2.3 диссертации.

В третьей главе продемонстрировано успешное применение МОЦО ГМЦ для исследования крупномасштабной изменчивости циркуляции Мирового океана. В первую очередь были исследованы процессы глубокой конвекции в открытом океане (раздел 3.1). Получены новые количественные результаты, подтверждающие высказывавшиеся ранее предположения (например, в работе [Marshall and Schott, 1999]) о причинах регионализации процессов наиболее интенсивной конвекции в Лабрадорском и Гренландском морях. Здесь же получены выводы о некоторых закономерностях сезонной и межгодовой изменчивости процессов глубокой конвекции в указанных районах. Обоснованность полученных результатов и выводов подтверждается удовлетворительным согласием расчетов с данными соответствующих натурных наблюдений.

В этой же главе представлены результаты исследования на базе МОЦО ГМЦ особенностей циркуляции в рамках лагранжевого подхода. Анализ расчетов ансамблевых траекторий движения частиц с нейтральной плавучестью, стартующих в нескольких районах Южного океана, показывает тенденцию к хаотизации адвекции и перераспределению вод по вертикали. Эти результаты важны для понимания и описания процессов переноса водных масс в разных частях Мирового океана.

Самая большая и ключевая **четвертая глава** диссертации посвящена разработке системы усвоения океанографических данных, как одной из главных

задач современной оперативной океанологии. Основные решения при построении системы, вытекающие из положительного опыта метеорологических приложений, связаны с использованием метода трёхмерного вариационного анализа в рамках циклической схемы “анализ - прогноз - анализ”. Обоснованность принятых решений подтверждается оценками точности восстановления полей температуры и солености воды (рис. 4.12 и 4.27), демонстрирующими преимущество системы усвоения данных по сравнению с климатическими обобщениями (атласы WOA) и расчетами по моделям без учета данных наблюдений. В этой главе представлена практическая реализация системы усвоения океанографических данных для Мирового океана, действующая в оперативном режиме, а также проведенный ретроспективный расчет (реанализ) основных гидрофизических полей Мирового океана, выполненный с помощью разработанной системы усвоения данных.

Завершающая **пятая глава** диссертации по научной направленности существенным образом отличается от предыдущих, поскольку в ней представлена система прогнозирования ветрового волнения в океане и морях. В качестве вычислительного ядра системы использована модель WaveWatch III, относящаяся к третьему поколению спектральных моделей ветровых волн. Эта часть работы имеет наибольшую практическую направленность. Система обеспечивает регулярный выпуск прогнозов параметров ветрового волнения для Мирового океана и морей европейской территории России. Оценки точности прогнозов, полученные сравнением с данными измерений высоты волн (спутниковая альтиметрия и волновые буи), показывают, что критерии качества прогнозов сопоставимы или превосходят соответствующие значения для других национальных и зарубежных прогностических систем.

В заключении сформулированы основные научные результаты диссертационной работы. К **наиболее значимым результатам** диссертационной работы можно отнести:

- модель общей циркуляции океана (МОЦО ГМЦ), включающую формулировку гидротермодинамической задачи, конечно-разностную аппроксимацию системы уравнений и численную реализацию программного комплекса;
- анализ физических механизмов развития и изменчивости конвективного перемешивания в открытом океане на суточном, сезонном и межгодовом масштабах по данным наблюдений и численных экспериментов с МОЦО ГМЦ;
- результаты исследования структуры и возможных путей распространения водных масс в циркуляционной системе Южного океана на основе анализа модельных траекторий жидких частиц;
- первую национальную систему усвоения океанографических данных для Мирового океана, действующую в оперативном режиме;
- единственный в России проведенный ретроспективный расчет (реанализ) основных гидрофизических полей Мирового океана, выполненный с помощью разработанной системы усвоения данных;
- комплексную систему прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях России.

В своей работе соискатель выполнил крупное комплексное, законченное научное исследование, основные компоненты которого перечислены выше. Необходимо еще раз отметить, что результаты работы имеют важное **научно-практическое** значение, так как используются в научных учреждениях Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России, а также могут быть востребованы в организациях Российской академии наук и для нужд ВМФ России.

Научные положения, выводы и рекомендации **достаточно полно** отражены в опубликованных работах и обсуждены на ряде авторитетных международных и отечественных научных конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликовано более 50 работ (не включая тезисы докладов), включая 20 статей в рецензируемых научных журналах из списка, рекомендованного ВАК. Можно констатировать, что по своему содержанию, полученным результатам и характеру выводов диссертация **полностью отвечает** специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

В целом диссертация изложена в хорошем научном стиле и ясным языком. Тем не менее, к представленной работе можно предъявить следующие замечания.

1. На стр. 54 уравнение для потенциальной температуры выписано в упрощённом виде, что представляется не совсем корректным, если претендовать на полную форму записи уравнений гидротермодинамики, «отражающих фундаментальные физические законы сохранения массы, импульса (второй закон Ньютона), тепла (первый закон термодинамики) и солей». В отличие от уравнения для солёности, которое действительно получается из дивергентного закона сохранения массы соли путём вычитания из него уравнения неразрывности, умноженного на солёность, уравнение для температуры содержит также термодинамическую температуру и теплоёмкость, которые желательно привести в уравнениях в полной форме. Эта форма записи уравнения (2.3) (см., например, Гилл, Т.1. 1986, стр. 92) может быть выписана как

$$\rho T c_p \frac{1}{\theta} \frac{D\theta}{Dt} = \text{div}(-\vec{q}_T) + \text{div}(-\kappa \vec{\nabla} T), \text{ где } T - \text{температура in situ, а } \theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p} -$$

потенциальная. Только затем, вводя различного рода упрощения (Буссинеска, постоянство теплоёмкости и др.) для перехода к упрощенной форме 2.3, температура in situ заменяется потенциальной.

2. Следует заметить, что “приближение тонкого океана”, которое сводится к замене истинного сферического слоя к так называемому “цилиндру над сферой”, обусловлено не только большим различием между горизонтальным и вертикальным масштабами. Это приближение несёт более глубокий смысл, поскольку необходимо для того, чтобы, в отличие от полной системы уравнений, в которой закон сохранения полной энергии содержит кинетическую энергию как половину от суммы квадратов трёх компонентов скорости, в *примитивной* системе уравнений выполнялся аналогичный закон, в который входят только *горизонтальные* составляющие скорости. Именно это свойство является характерной чертой системы *примитивных* уравнений, и это следует подчеркнуть. Кроме того, *примитивная* система уравнений требует также включения только

горизонтальных компонентов силы Кориолиса, не содержащих вертикальной скорости, что тоже можно было бы отметить.

3. Стр. 60. Уравнения для баротропной задачи не всегда интегрируются явно с мелким шагом по времени (т.н. split-explicit method). Так, например, используется также и интегрирование этих уравнений с использованием неявных схем по времени (Дианский, 2013), что позволяет использовать для их решения бароклиный шаг, фильтруя быстрые баротропные гравитационные волны.

4. Стр. 78. Имеется противоречие в формулах 2.49 и 2.52 для кориолисовых членов. Кроме того, неявность $\alpha_i \geq 0,5$ в них вводится не для того, чтобы «фильтровать инерционные и баротропные волны Россби», а просто для того, чтобы численная схема по времени по отношению к кориолисовым членам была устойчивой.

5. В качестве параметризации вертикального турбулентного перемешивания в МОЦО ГМЦ используется интегральная модель верхнего перемешанного слоя (ВПС), которая приводит к рассмотрению профилей температуры и солёности с разрывом на глубине ВПС и, тем самым, к несогласованности этих профилей с исходной сеткой по вертикали. В диссертации не сказано, как осуществляется это согласование, нужное, например, для разностной записи уравнения переноса.

6. В разделе 3.1 диссертации при анализе механизмов глубокой конвекции в Северной Атлантике продемонстрирована важная роль динамической преуобусловленности эпизодов конвекции, достигающей глубин более одного километра. Для этого анализируются поля скорости и вихря скорости течений в бароклинном слое, которые косвенно свидетельствуют (с учетом геострофичности циркуляции в открытом океане) о поднятии изопикнических поверхностей в рассматриваемых районах. Но представление распределений плотности на нескольких горизонтах могло бы дать более наглядное и прямое подтверждение рассматриваемого объяснения локализации глубокой конвекции.

7. Применение лагранжевого подхода для анализа циркуляции (раздел 3.2) показывает достаточную эффективность для исследования процессов адвекции и путей распространения водных масс в океане. Однако рассмотрение в работе ограничено Южным океаном. Очевидное обобщение разработанного метода и соответствующего программного обеспечения на рассмотрение процессов, связанных с "глобальной конвейерной лентой" океана, в работе отсутствует.

8. Стр. 159 на рис. 4.5в наглядно демонстрируется прохождение бароклиной волны Кельвина, приводящая к явлению Эль-Ниньо. Однако в работе не анализируется обнаруженный эффектный факт проявления формирования Эль-Ниньо.

9. Стр. 173 на рис. 4.16. приводится рассчитанная циркуляция Мирового океана на поверхности и глубине 30 в сравнении с циркуляцией по дрейфтерным данным на глубине 15 м. Однако не анализируются значительные расхождения с наблюдаемой циркуляцией на экваторе и в области Перуанского течения. Возможно, это связано с тем, что в работе недостаточно внимание уделяется

приэкваториальной циркуляции Тихого океана, тесно связанной с воспроизведением Эль-Ниньо.

10. Как правило, для оценки возможностей МОЦО демонстрируется ряд осредненных по времени характерных интегральных характеристик, позволяющие судить о качестве климата циркуляции Мирового океана, воспроизводимого моделью. К ним относятся: зонально осредненные распределения температуры и солености по широте и глубине в сравнении с данными наблюдений; меридиональная функция тока для Мирового океана в целом, Атлантического океана и Тихого и Индийского океанов вместе; связанные с ними меридиональные переносы тепла; разрезы вдоль и поперек экватора зональной скорости в Тихом океане. В диссертации же приводятся только; меридиональная функция тока для вышеуказанных акваторий за 2006-2014 гг. В целом их вид вполне соответствует современному представлению о климатической циркуляции Мирового океана. Однако хотелось бы видеть и другие интегральные характеристики. Кроме того, автор почему-то не приводит среднюю функцию тока баротропной циркуляции, которая могла бы показать не только качество баротропной циркуляции, но и воспроизведение отфильтрованного от быстрых гравитационных волн уровня океана, косвенно связанного с этой функцией тока.

Кроме того, к диссертации имеется ряд редакционных замечаний.

1) Стр. 56. В уравнении 2.7 выражения являются эквивалентными, одно из них лучше было бы убрать либо поставить между ними союз «или». Здесь же желательно раскрыть смысл “метрической” частоты адвекции, который заключается в том, что при переносе векторного поля в криволинейной системе координат изменяются углы наклона локальных координатных осей, вследствие чего меняются и проекции вектора на эти оси, что выражается простой операцией поворота. При этом используются символы логарифма для размерных величин.

2) Стр. 59. Так называемый «неприемлемый лобовой подход» к решению уравнений с шагом, привязанным к скорости быстрых гравитационных волн, в некоторых случаях является вполне приемлемым и успешно применяется в ряде задач. В данном случае, конечно, стоит вопрос только об эффективном быстродействии.

3) Стр. 62. Ссылка на работу (Яковлев, 2003) применительно к сигма модели ИВМ ран представляется не совсем уместной.

4) Стр. 64. При изменении системы координат слагаемые, отвечающие за силу Кориолиса, не меняются, если параметр Кориолиса изначально привязан к географической широте. В негидростатическом случае ситуация несколько сложнее из-за вертикальной составляющей силы Кориолиса. В любом случае, формулировка этих слагаемых в общем виде позволяет не вести речи об их изменении при переходе в систему координат, отличную от географической.

5) Стр. 64. При описании трёхполюсной системы координат не упомянута модель MOM (Modular Ocean Model), разработанная в GFDL (Geophysical Fluid

Dynamics Laboratory) – один из мировых флагманов в области моделирования океана.

6) Стр. 67-68. Форма записи оператора горизонтальной вязкости представляется не совсем удачной. Если выписать её в общем виде через компоненты тензора напряжений, она, во-первых, была бы более компактной и наглядной, а во-вторых, не было бы необходимости ограничиваться приближением постоянного коэффициента.

7) Стр. 70. В уравнении 2.26с следует отметить, что поток соли, обусловленный потоком пресной воды, носит искусственный характер, поскольку никаких реальных потоков соли осадки и испарения не вносят, но создают изменения солёности, которые необходимо параметризовать в моделях с фиксированным объёмом бассейна. В моделях с переменным объёмом этот приём не нужен.

Указанные замечания не изменяют основные результаты и выводы диссертационной работы. Более того, обилие замечаний вызвано тем, что оппонент настоятельно рекомендует соискателю опубликовать результаты диссертационной работы в виде монографии, в которой должно быть как можно меньше погрешностей. В целом диссертация представляет собой законченную работу, имеющую высокую актуальность и практическую значимость, её основные результаты опубликованы в цитируемых изданиях, автореферат хорошо отражает содержание диссертации.

Представленная диссертационная работа полностью соответствует требованиям пункта 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а ее автор Зеленко Александр Андреевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник кафедры физики моря и вод суши (Физический факультет, Отделение геофизики МГУ имени М.В. Ломоносова)

Дян 26.11.18

Дианский Николай Ардальевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова). ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1, Главное здание, Физический факультет, г. Москва, 119991.

Тел: +7 (495) 939-31-60

E-mail: nikolay.diansky@gmail.com

Подпись д.ф.-м.н. Николая Ардальевича Дианского заверяю

Декан физического факультета МГУ



/Сысоев Н.Н./