

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИО РАН,
д. геогр. наук
Соков А.В.
2021г.
ПЕЧАТЬ



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу **Пережогина Павла Александровича** «Стохастические и детерминистические подсеточные параметризации для двумерной турбулентности и их применение в моделях циркуляции океана», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы диссертации

Основная цель представленной работы – создание новой параметризации мезомасштабных вихрей для более достоверного описания динамики океана при помощи современных «вихредопускающих» численных моделей. Новая параметризация основана на подходе обратного перераспределения кинетической энергии (ОПКЭ) в условиях квазидвумерной турбулентности, при этом вихредопускающие модели рассматриваются как LES (Large Eddy Simulation) модели. Обобщенные задачи диссертационной работы включают: (1) исследование влияния различных типов численных аппроксимаций адвективного слагаемого на статистически-равновесные состояния, возникающие в двумерной идеальной жидкости и в двумерной форсированной вязкой жидкости; (2) построение спектральных характеристик «подсеточных сил» в задаче вынужденной двумерной турбулентности с учетом численных аппроксимаций адвекции и соответствующие им ОПКЭ; (3) исследование воспроизведения баротропной неустойчивости при грубом пространственном разрешении и влияния подсеточных параметризаций на рост неустойчивых мод; (4) внедрение и оценка новой параметризации ОПКЭ в модель динамики океана NEMO.

Современные подходы к параметризации подсеточной вихревой динамики созданы для вихредопускающих моделей океана (горизонтальное разрешение более 1°). При увеличении разрешения крупные мезомасштабные вихри начинают разрешаться явным образом, и такие параметризации становятся неприменимыми.

Быстрое развитие вычислительной техники делает доступными эксперименты с высоким горизонтальным разрешением, в том числе и для климатических экспериментов класса CMIP, и поэтому разработка новых схем параметризаций подсеточной вихревой динамики является актуальной задачей.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, четырех приложений и списка использованных источников, включающего 158 наименований, из которых более 145 на иностранных языках. Общий объем работы составляет 152 страницы, включая 49 рисунков и 9 таблиц.

Во введении диссертации ясно и подробно обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи, изложена научная новизна исследования, логично объединенная с основными положениями, выносимыми на защиту. Большое внимание уделено обзору современных параметризаций двумерной и трехмерной подсеточной турбулентности. Рецензенты хотели бы указать автору на допущенную во введении неточность – разрешение сетки модели $1/4^\circ$ на 45° градусе широты соответствует ~ 20 км, что означает, что на каждый отдельный вихрь приходится одна-две точки, которые позволяют увидеть вихрь только как максимум/минимум завихренности, что нельзя назвать “частичным разрешением”, именно поэтому модели вихредопускающие. Рецензентам кажется более уместной следующая форма: “частично разрешают крупные мезомасштабные вихри” с указанием их размера - в данном случае больше 200 км, следуя правилу, что для разрешения численной моделью некоторого объекта требуется не менее 10×10 точек. Также, в описании важности корректного воспроизведения океанских вихрей в моделях океана, автор не упоминает о важности влияния вихрей на вертикальное перемешивание и стратификацию океана. Говоря о влиянии ошибок аппроксимации численных схем на ослабление вихревой динамики в моделях, автор не раскрывает о каких ошибках идет речь и не приводит ссылок, это утверждение подтверждающих. Рецензенты полагают уместным следующий комментарий рекомендательного характера. Понятно, что в силу формального присутствия членов, описывающих ошибки аппроксимации, в уравнении движения, к ним может быть применен термин “подсеточные силы”, однако рецензенты порекомендовали бы использовать формулировку “подсеточные эффекты”. Кроме того, обоснованность использования этого сокращения подвергается сомнению, так как далее по тексту не всегда ясно, о какой части - физической или чисто вычислительной этих

“сил” идет речь. Рецензенты нашли уместным также указать на то, что скалярной величиной, рассматриваемой в океанологии, является не “соль”, так как соль находится в океане в виде раствора, а соленость (salinity) морской воды. Если автор претендует на ознакомление с приведенным в работе списком литературы, этой неточности следовало избежать.

В первой главе «Исследование когерентных структур в идеальной (невязкой) жидкости и в форсированной турбулентности» исследуется способность трех конечномерных аппроксимаций идеальной жидкости, принадлежащих к классу систем гидродинамического типа, воспроизводить крупные когерентные структуры при статистически-равновесных состояниях, возникающих в двумерной идеальной жидкости и в форсированной вязкой жидкости. Показано, что равновесные состояния находятся в сильной зависимости от аппроксимации адвективного слагаемого.

Во второй главе «Исследование влияния численных схем адвекции на воспроизведение обратного каскада энергии» исследуется влияние выбора численной схемы адвекции на воспроизведение обратного каскада энергии при различном соотношении между масштабом внешнего воздействия и шагом расчетной сетки. Следует подчеркнуть, что выбранные схемы являются активно используемыми в настоящий момент в численных моделях атмосферы и океана. Показано, что динамика крупных масштабов не зависит от выбранной схемы аппроксимации в случае, если внешнее воздействие находится в длинноволновой части спектра кинетической энергии. Однако, если форсинг находится в мелких масштабах, то наблюдается нарушение обратного каскада во всех рассмотренных схемах.

В третьей главе «Исследование влияния подсеточных параметризаций на воспроизведение обратного каскада энергии» приводится анализ взаимодействия разрешаемых и неразрешаемых на вычислительной сетке грубой модели течений с учетом численной аппроксимации адвекции и построены спектральные характеристики энергетического вклада неразрешаемых течений. Показан систематический энергетический вклад подсеточных сил в формирование инерционного интервала обратного каскада энергии. Причем одинаковый для рассматриваемых трех конечно-разностных схем второго порядка. Также продемонстрировано, что наилучший результат возможно получить для комбинированной (стохастическая + модель подобия масштабов) модели, для которой спектр энергии восстанавливается на всем инерционном интервале обратного каскада энергии. Комбинированная модель требует настройки свободных параметров, поэтому был предложен оптимальный способ их

получения (экспериментальным путем). Некоторое недоразумение вызывает использование сокращения ОПКЭ - оно имеет средний род (перераспределение), но всюду в тексте согласуется по мужскому роду, как “каскад”. Пояснение к рисунку 3.4 оставляет без ответа вопрос, какова причина пониженной, относительно эталонной модели, величины компенсированного значения энергии на мелких масштабах ($70 < k < 90$) для моделей Z и CCS, даже в комбинированной модели.

В четвертой главе «Исследование влияния подсеточных параметризаций на воспроизведение баротропной неустойчивости» рассматривается вклад от использования подсеточных параметризаций в условиях геофизического течения (когда подсеточные вихри влияют на среднее течение и турбулентные флуктуации). Такие параметризации могут быть полезны и в задачах с сильным средним течением. Показано, что максимальное соответствие эталонной модели в энергии второй неустойчивой моды демонстрирует комбинация схем параметризации отрицательной вязкости и подобия масштабов.

Пятая глава «Подсеточные параметризации в модельной конфигурации Double Gyre в модели океана NEMO» описывает сравнение двух схем подсеточной параметризации (отрицательной вязкости и стохастической) в модели NEMO на примере идеализированной конфигурации двойного круговорота. Применение параметризаций ОПКЭ позволяет увеличить вихревую кинетическую энергию, это приводит к тому, что разрешаемая вихревая активность изменяет явно воспроизводимые меридиональный вихревой поток тепла и функцию тока меридиональной опрокидывающей циркуляции до значений, близких к значениям, наблюдаемым в эталонной модели. Рецензенты рекомендуют при первом упоминании конфигурации модели NEMO Double Gyre указать, что данная конфигурация является идеализированной. Некорректным кажется рецензентам пояснение к рисунку 5.1, отображающему мгновенное поле завихренности “в единицах параметра Кориолиса”. Параметр Кориолиса, как и завихренность, измеряются в $1/с$. Скорее всего имелась в виду завихренность, нормированная на параметр Кориолиса. В противном случае не до конца ясно, что имеется в виду.

В шестой главе «Спектральные характеристики подсеточных сил и подсеточных параметризаций в модели океана NEMO» рассматриваются более реалистичные конфигурации NEMO, при которых необходимо проводить настройку свободных коэффициентов параметризаций (в особенности масштаба возвращения энергии и количества возвращаемой энергии). Глава содержит большое число полезных выводов,

среди самых основных следует отметить, что физический масштаб, на котором происходит возвращение энергии, приблизительно соответствует масштабу бароклинной неустойчивости. Параметризация отрицательной вязкости достоверно воспроизводит этот масштаб, а для стохастической параметризации требуется настройка радиуса корреляции по пространству в зависимости от разрешения грубой модели. Рецензенты замечают автору, что, пользуясь оценкой масштаба вихрей по первому радиусу деформации Россби, можно заключить, что конфигурация R9 также только частично является вихреразрешающей моделью.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные соискателем, которые полностью соответствуют существу выполненного исследования.

Научная новизна

В работе предложены новые методы анализа и построения подсеточных замыканий, которые учитывают особенности динамики квазидвумерных жидкостей и влияние численных аппроксимаций адвекции. Предложен спектральный подход к диагностике частично неразрешенного на сетке обратного каскада энергии, который демонстрирует необходимость использования параметризаций ОПКЭ с крупномасштабной спектральной плотностью генерации энергии. Параметризации, настроенные по результатам априорного анализа, способны улучшать динамику воспроизводимой на грубой сетке турбулентности. Авторская методика продемонстрирована на ряде модельных задач и в модели океана NEMO.

Практическая значимость работы

Важным результатом работы является внедрение новой параметризации в модель динамики океана NEMO, что потенциально позволяет без дополнительных сложностей проводить расчеты, используя новую параметризацию, широкому кругу исследователей по всему миру. Постепенное развитие вычислительной техники позволит явно разрешать в численных моделях мезомасштабные вихри в средних широтах, однако, поскольку размер мезомасштабных вихрей зависит от широты и уменьшается к полюсам, разработанные параметризации останутся востребованными в ближайшем будущем. Необходимость проведения палеоклиматических расчетов на временных масштабах порядка десятков тысяч лет обуславливает востребованность параметризаций ОПКЭ в долгосрочной перспективе. Разработанные автором

параметризации могут быть использованы для улучшения динамики моделей океана в таких научных центрах как ИО РАН, ИВМ РАН, ИБРАЭ РАН, ИВМиМГ СО РАН.

Достоверность полученных результатов, публикации и апробация

Полученные в работе результаты являются достоверными. При разработке подсеточных замыканий автор применяет методику изучения не разрешаемых нелинейных взаимодействий с подсеточными масштабами по данным априорного анализа. Проверка полученных параметризаций проводится в ходе апостериорных экспериментов, то есть путем сравнения статистических характеристик решения грубых моделей с данными модели высокого разрешения. Описанный цикл разработки и тестирования подсеточных моделей является общепринятым. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 работах в рецензируемых научных изданиях; четыре работы опубликованы в изданиях из списка ВАК, и все работы включены в международные базы данных Scopus и Web of Science. Результаты работы докладывались на российских и международных научных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

1. Обращает на себя внимание неаккуратность при оформлении графического материала: большинство представленных рисунков как в диссертации, так и в автореферате, выполнены на английском языке. Что странно, учитывая использованный для визуализации инструмент (python), в котором создание кириллических подписей можно реализовать без труда. У многих рисунков нет подписи оси ординат.
2. В тексте диссертации и автореферата присутствуют опечатки (пропущены знаки препинания, математические знаки (дефисы, равно и т.д.), не согласованы части предложения).
3. Также наблюдается неаккуратность в математическом изложении. К примеру, производные по пространству иногда обозначаются как $\frac{\partial}{\partial x_i}, \frac{\partial}{\partial x_j}$ (стр. 74), а иногда как $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}$ (стр. 75). Это обстоятельство затрудняет понимание.
4. В разных главах диссертации используются разные системы координат при построении выкладок уравнений, связанных логически ссылками: в первой главе горизонтальные оси названы x, y , во второй главе – x_1, x_2 .

5. На странице 43 диссертации последний абзац, повествующий о схемах расчета Аракавы, вырван из контекста и логически ни с чем не связан.

Несмотря на приведенные замечания, рецензентам приятно отметить высокое качество и стиль текста диссертации. Несомненно, автором диссертации проведена огромная, сложная и кропотливая работа по систематизации имеющихся в области исследований знаний и разработке по-настоящему нового инструмента для решения поставленной цели.

Заключение о диссертации

Диссертация Пережогина Павла Александровича «Стохастические и детерминистические подсеточные параметризации для двумерной турбулентности и их применение в моделях циркуляции океана» является законченным научно-квалификационным исследованием, в котором предлагается решение задачи построения подсеточных параметризаций мезомасштабных вихрей в численных моделях океана. Работа соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Выносимые на защиту результаты работы обладают научной новизной, личный вклад автора в их получение не подлежит сомнению. Изложенные в работе результаты известны научной общественности по публикациям и по представлению на научных конференциях. Диссертация и автореферат написаны уверенным научным языком и адекватно отражают содержание работы. Диссертация отвечает требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Пережогин Павел Александрович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании лаборатории взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений ИО РАН, протокол от 18 мая 2021 года.

Полное название организации: ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

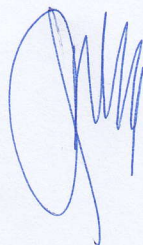
Адрес: 117997, Российская Федерация, Москва, Нахимовский проспект, дом 36

Сайт организации: <https://www.ocean.ru/>

Электронная почта: office@ocean.ru

Телефон: +7 (499) 124-59-96

Заведующий лабораторией
взаимодействия океана и атмосферы
и мониторинга климатических изменений
член.-корр. РАН, д.ф.-м.н.



Гулев Сергей Константинович

Подпись Гулева С.К. заверяю



Верно:

Зав. канцелярией ИО РАН

Гимболова ВВ
