

Результаты публичной защиты

Дата защиты: 10 июня 2021 г.

Соискатель: Пережогин Павел Александрович.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Стохастические и детерминистические подсеточные параметризации для двумерной турбулентности и их применение в моделях циркуляции океана».

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отрасль наук: физико-математические науки.

На заседании председательствует – Заместитель председателя диссертационного совета член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., профессор В.Ф.ТИШКИН

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

На заседании из 24 членов диссертационного совета присутствовали 17 человек, из них 6 докторов по профилю рассматриваемой диссертации.

1.	ТИШКИН В.Ф.	д.ф.-м.н.	01.01.07
2.	КОРНИЛИНА М.А.	к.ф.-м.н.	05.13.18
3.	АНДРЕЕВ В.Б.	д.ф.-м.н.	01.01.07
4.	ВАСИЛЕВСКИЙ Ю.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
5.	ГАСИЛОВ В.А.	д.ф.-м.н.	01.02.05
6.	ГОЛОВИЗНИН В.М.	д.ф.-м.н.	01.02.05
7.	КАРАМЗИН Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
8.	КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
9.	КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
10.	КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
11.	ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
12.	МАЖУКИН В.И.	д.ф.-м.н.	05.13.18
13.	МИХАЙЛОВ А.П.	д.ф.-м.н.	05.13.18
14.	ОРЛОВ Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
15.	ПОЛЯКОВ С.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
16.	ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
17.	ЯКОВОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял решение: присудить Пережогину Павлу Александровичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заключение диссертационного совета приведено ниже:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 10.06.2021 № 4

О присуждении **Пережогину Павлу Александровичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Стохастические и детерминистические подсеточные параметризации для двумерной турбулентности и их применение в моделях циркуляции океана», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 30 марта 2021 года (протокол заседания №4/пз) диссертационным советом Д002.024.03 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», 125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки России №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Пережогин Павел Александрович** 1994 года рождения, в 2017 году окончил Московский физико-технический институт (НИУ) по специальности 03.04.01 – Прикладные математика и физика.

В 2020 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук. В настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН.

Научный руководитель – Глазунов Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН.

Официальные оппоненты:

Дружинин Олег Александрович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией №270 Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Курганский Михаил Васильевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник (уч. звание), главный научный сотрудник лаборатории геофизической гидродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук» (ИО РАН), г. Москва, в своем **положительном** заключении, подписанном **Гулевым Сергеем Константиновичем**, доктором физико-математических наук, член.-корр. РАН, заведующим лабораторией взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений, и утвержденном директором института доктором географических наук **Соковым Алексеем Валентиновичем**, указала, что диссертационная

работа Пережогина П.А. 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. 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».

Соискатель имеет 8 опубликованных работ по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях, которые индексируются в международных базах данных Scopus или Web of Science. Из них 4 работы [3, 5, 6, 7] опубликованы в журналах из списка ВАК по профилю специальности. Соискатель и соавторы принимали участие в постановке задач и интерпретации результатов. Численные эксперименты и подготовка научных публикаций проведены лично автором. Все выносимые на защиту результаты принадлежат соискателю лично. Публикации отражают основные результаты диссертационного исследования. Недостоверных сведений в тексте диссертации об опубликованных соискателем работах нет.

Список публикаций соискателя:

1. Пережогин П. А., Дымников В. П. Равновесные состояния конечномерных аппроксимаций уравнений двумерной идеальной жидкости //Нелинейная динамика. – 2017. – Т. 13. – №. 1. – С. 55-79.
2. Пережогин П. А., Дымников В. П. Моделирование квазиравновесных состояний двумерной идеальной жидкости //Доклады академии наук. –

Федеральное государственное бюджетное учреждение" Российская академия наук", 2017. – Т. 474. – №. 1. – С. 36-40.

3. Perezhugin P. A., Glazunov A.V., Mortikov E.V., Dymnikov V.P. Comparison of numerical advection schemes in two-dimensional turbulence simulation //Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2017. – Т. 32. – №. 1. – С. 47-60.
4. Дымников В. П., Пережогин П. А. О системах гидродинамического типа, аппроксимирующих уравнения двумерной идеальной жидкости //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 54. – №. 3. – С. 272-282.
5. Perezhugin P. A., Glazunov A. V., Gritsun A. S. Stochastic and deterministic kinetic energy backscatter parameterizations for simulation of the two-dimensional turbulence //Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2019. – Т. 34. – №. 4. – С. 197-213.
6. Perezhugin P. A. 2D turbulence closures for the barotropic jet instability simulation //Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2020. – Т. 35. – №. 1. – С. 21-35.
7. Perezhugin P. A. Testing of kinetic energy backscatter parameterizations in the NEMO ocean model //Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2020. – Т. 35. – №. 2. – С. 69-82.
8. Perezhugin P. Deterministic and stochastic parameterizations of kinetic energy backscatter in the NEMO ocean model in Double-Gyre configuration //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – Т. 386. – №. 1. – С. 012025.

Общий объем научных публикаций по диссертационной работе составляет 13.2 п.л., авторский вклад соискателя 9.2 п.л. Три статьи написаны соискателем полностью самостоятельно.

В работах [1, 2, 3, 4] соискателя исследуется роль численных аппроксимаций адвекции в формировании крупномасштабных когерентных структур в идеальной двумерной жидкости и обратного каскада энергии в

вынужденной двумерной турбулентности, также производится сравнение характеристик крупномасштабных когерентных структур в идеальной и вязкой жидкостях. В работе [5] проводится анализ подсеточных сил в задаче моделирования обратного каскада энергии и строятся схемнозависимые параметризации ОПКЭ. Показано, что использование параметризаций ОПКЭ позволяет восстановить обратный каскад энергии. В работе [6] исследуется роль подсеточных параметризаций в задаче развития баротропной неустойчивости струйного течения. Показано, что подсеточные параметризации способны ускорить наступление турбулентного режима течения. В работах [7, 8] исследуются параметризации ОПКЭ, реализованные автором в модели океана NEMO. Показано, что стохастическая и детерминистическая параметризации способны улучшить воспроизведение океанической квазидвумерной турбулентности. В частности, улучшения наблюдаются в уровне вихревой кинетической энергии, вихревом потоке тепла и меридиональной опрокидывающей циркуляции.

Основные результаты работы представлены на следующих конференциях:

- 58-я, 59-я, 60-я, 61-я, 62-я научные конференции МФТИ, Москва, Россия, 2015 – 2019
- Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: "CITES-2017", 28 августа – 7 сентября 2017, и "CITES-2019", 27 мая – 6 июня 2019, Москва, Россия
- 21-я Всероссийская школа-конференция молодых ученых "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы" (SatЭП-2017), Борок, Россия, 6-10 июня 2017
- International Symposium Topical Problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2017), Нижний Новгород, Россия, 22-28 июля 2017
- International Union of Geodesy and Geophysics 32nd IUGG Conference on Mathematical Geophysics, Нижний Новгород, Россия, 23-28 июня 2018

- Международная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика А.М. Обухова "Турбулентность, динамика атмосферы и климата", Москва, Россия, 16-18 мая 2018
- Всероссийский форум Суперкомпьютерные технологии и искусственный интеллект, Нижний Новгород, Россия, 26-30 ноября 2018
- Международная конференция "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2019" (АПВПМ-2019), Новосибирск, Россия, 1-5 июля 2019
- Winter school "Physics and Mathematics of Turbulent flows at different scales", Лес Уж, Франция, 24 февраля – 1 марта 2019
- Summer school "Mathematics for Climate and the Environment", Каржез, Корсика, Франция, 9-13 сентября 2019
- Workshop on Novel Approaches in Observations and Modeling of Geophysical Turbulence, Москва, 6, 8 июля 2019
- EGU General Assembly 2020, Вена, Австрия, 4-8 мая 2020
- ECMWF Annual Seminar 2020, 14-18 сентября 2020
- Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова "Турбулентность, динамика атмосферы и климата", Москва, 10–12 ноября 2020
- AGU fall meeting, Новый Орлеан, США, 1-17 декабря 2020

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы.

Отзыв официального оппонента Дружинина О.А.

В отзыве имеются следующие замечания:

1. Общее замечание по диссертации: хотелось бы видеть, как уравнения двумерной турбулентности (1.23), обсуждаемые в первой части (главы 1-4) могут быть получены из уравнений (5.2)-(5.4) трехмерного, реального океана – возможно, это помогло бы определить физическую природу априорно задаваемых коэффициентов диссипации и форсинга модели двумерной турбулентности (см. ниже п.2).

2. Глава 1, раздел 1.3: Неясно, какие пространственно-временные масштабы используются при обезразмеривании переменных в уравнении (1.23) (с. 34, 36). Также неясно, из каких соображений выбраны значения вязкости μ , коэффициента трения α , и волнового числа и плотности энергии форсинга k и ε в численном эксперименте, и какое отношение это выбор имеет к натурным значениям этих параметров. Неясно насколько чувствительны результаты главы 1 к вариациям этих параметров. Такой же вопрос к выбору параметров форсинга и трения в гл. 2. (с. 46).
3. Глава 2: Не обсуждается, что подразумевается под термином “DNS” (с.46), т.к. не указан масштаб вязкой диссипации. Видимо предполагается, что при дальнейшем уменьшении размера ячеек сетки результаты (например, спектр на рис. 2.2, 2.3) мало меняются.
4. Основной вывод 4й главы состоит том, что обсуждаемые в 3й главе модели (стохастическая, подобия масштабов, отрицательной вязкости) недостаточно достоверно воспроизводят развитие неустойчивости двумерной струи по результатам модели высокого разрешения. Означает ли это, что предлагаемые замыкания не могут быть использованы в модели реального океана в присутствии крупномасштабных (зональных) течений?
5. Глава 5: Уравнения (5.2)-(5.4) подразумевают, что поле горизонтальной скорости – дивергентное («сжимаемое»), поскольку уровень свободной поверхности изменяется во времени и в пространстве, и вертикальная компонента скорости определяется условием бездивергентности полной скорости. Неясно, как тогда определяется горизонтальная скорость через функцию тока (5.11), т.к. обычно возможность определения функция тока подразумевает бездивергентность поля скорости.
6. Является ли область счета на рис. 5.1 (и далее) прототипом какой-то области реального океана (по долготе и широте – это гольфстрим?), или это чисто модельная задача? Чем обусловлена повышенная вихревая

активность на рис. 5.3 (широта $30^0 - 40^0$, долгота $-80^0 - -70^0$). Чем обусловлено возникновение зонального течения в этой области (воздействие атмосферы, ветер?).

Замечание по тексту:

С.88, 2й пар., 6я стр. и везде по тексту: « ... уравнение на эволюцию...» - по-видимому, имеется ввиду «...уравнение, описывающее эволюцию ...».

Отзыв официального оппонента Курганского М.В.

В отзыве имеются следующие замечания:

1. На стр. 27 в плане схемы, сохраняющей энергию и энстрофию, можно было бы сказать несколько слов о связи с механикой Намбу (Nambu 1973, Salmon 2007).

2. Стр. 37, замечание автора: «Стоит отметить, что распределения завихренности по площадям, близкие к гауссовому, наблюдались и при вычислениях по реальным данным в атмосфере (500 мб поверхность)». Здесь имеется тонкость. Следует различать относительную и абсолютную завихренности. Автор, видимо, имеет в виду относительную завихренность, но индивидуально сохраняется именно абсолютная завихренность и инвариантным является распределение площади изобарической поверхности 500 мб именно по ней. Имеются указания на то, что последнее распределение может быть не гауссовым.

3. Раздел 1.3. В диссертации не очень много ссылок на отечественных авторов. При обсуждении того, как релеевское трение блокирует обратный каскад энергии можно было бы сослаться на работы Ф.В. Должанского, в частности на статью (Dolzhanskii F.V., Manin D. Yu. On the effect of turbulent Ekman layer on global atmospheric dynamics // Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics. 1993. V. 72. P. 93).

4. Стр. 23. Когда речь идет об асимптотическом случае динамики двумерной жидкости при очень малой вязкости (в диссертации это названо «разрушающейся турбулентностью») вероятно надо отметить, что это происходит при отсутствии внешних сил. Кстати, этот термин не вполне

общепринят и русскоязычной литературе также говорят о «затухающей турбулентности» (decaying turbulence). Ее конечно надо отличать от вынужденной турбулентности, что исследуется в разделе 1.3 и далее во второй главе.

5. В разделе 2.1 на стр. 41 сказано, что использование бигармонического оператора в правой части уравнений движения сделано для «подавления численных шумов». На мой взгляд, это несколько поверхностное утверждение и правильная интерпретация состоит в том, что такая высокоселективная вязкость выбрана для того, чтобы усилить прямой каскад энтропии и, как следствие, обратный каскад энергии к большим масштабам. Как правильно сказано автором десятком страниц спустя, на стр. 49 и 52 диссертации, использование такой «гипервязкости» приводит к диссипации энтропии, но при этом схема является практически консервативной по энергии. Поэтому уменьшается средний квадрат волнового числа, т.е. моделируется усиление обратного каскада энергии.

Коррелирует со сказанным и утверждение автора на стр. 12 о том, что «у моделей с вихревой вязкостью есть и очевидный недостаток: вместе с энтропией диссипируется и энергия, хотя согласно теории KLB прямой каскад энергии отсутствует». Энергия диссипирует при любой вязкости, в том числе ньютоновской, но смысл «гипервязкости» именно в том, что она минимально воздействует на энергию, разрушая в основном энтрофию. На мой взгляд, это согласуется с теорией Крейчнана-Лейса-Бэтчелора двумерной турбулентности, согласно которой определяющим является прямой каскад энтропии, но сопровождающий его малый (динамически второстепенный, несущественный) перенос энергии к мелким масштабам обязан присутствовать.

6. Стр. 39. Следует пояснить, между какими схемами имеются в виду отличия при моделировании вынужденной турбулентности.

7. Стр. 50. Опечатка: «асинптотику» => «асимптотику».

8. Таблицы 1, 2 и в других местах. Я не очень понимаю, почему используются символы частного дифференцирования по времени применительно к энергии и энтропии, хотя это величины, зависящие только от времени. Почему не использовать обычную («прямую») производную по времени?

9. Стр. 54. Имеется небольшая описка в формуле (3.1).

10. Стр. 55. Не объяснена аббревиатура EDQNM □ eddy-damped quasi-normal Markovian (EDQNM) theory.

11. Стр. 56 и далее. В этой главе черта сверху обозначает спектральный фильтр; комплексное сопряжение обозначается звездочкой. Впоследствии в главе 4, стр. 77, комплексное сопряжение обозначается чертой сверху, т.е. не выдержан единый стиль обозначений.

12. Стр. 61. «Коэффициент затухания» в выражении для авторегрессионного процесса чаще называется коэффициентом авторегрессии.

13. Стр. 76. Имеется описка в выражении для оператора $A(y)$.

14. Стр. 78. Таблица 4. Почему имеется два ряда чисел в колонках 1-3 и почему вместо четвертой моды в числе наиболее быстро растущих указана первая мода?

15. Общее стилистическое замечание: многие рисунки в диссертации тоновые (черно-белые), т.е. речь идет не о цвете (как пишет автор), а о насыщенности (серого) тона.

16. Стр. 87. Я не очень понимаю, почему автор называет основной причиной подавления мелкомасштабных неустойчивых мод (мод с высокими номерами) сглаживание среднего струйного течения вихревой вязкостью (описываемой бигармоническим оператором). На мой взгляд, речь скорее идет не о сглаживании среднего течения, а о подавлении вязкостью наиболее мелкомасштабных неустойчивых мод, когда имеется определенная конкуренция между инкрементом роста неустойчивых возмущений, как это было бы в идеальной жидкости, и декрементом затухания при наличии высокоселективной (по значениям волнового числа) вязкости.

17. Стр. 89. К сожалению, описывая модель NEMO, автор действовал достаточно формально и не объяснил причины поворота расчетной области на 45 градусов к зональному направлению.

18. Стр. 90. Подпись к рисунку 5.1. Какое значение параметра Кориолиса f бралось? На средней широте 30° ?

19. Там же. Вместо белого квадрата видимо должен быть указан белый прямоугольник.

20. Стр. 91. Для меня не очень понятна и требует пояснения формулировка граничного условия: «свободное проскальзывание (относительная завихренность равна нулю на границе)». Будучи понято буквально, условие «свободного проскальзывания» (free-slip), т.е. неравенства нулю тангенциальной компоненты скорости на границе, допускает ненулевой сдвиг скорости в направлении нормальном к границе, а потому может иметься ненулевая завихренность.

21. Стр. 91. «Поток свежей воды» видимо следует перефразировать как «поток пресной воды».

22. Стр. 112. Имеется вопрос к рисунку 6.2 (с): почему «бездивергентная» часть спектрального потока энтропии столь незначительна?

23. Стр. 112. Заключительная фраза на этой странице: «Прямой каскад энергии обязательно должен существовать, так как он связан с прямым каскадом энтропии». У меня вопрос: как это согласуется с первой главой, где говорилось, что в двумерной турбулентности на малых масштабах прямой каскад энергии отсутствует? Может здесь в океане сказывается эффект трехмерности?

24. Основное замечание к работе следующее: автором показано, что в тех или иных постановках задачи та или иная параметризация подсеточных сил является преимущественной. Возникает вопрос, можно ли в целом, на основе всего диссертационного исследования, выделить наилучшую параметризацию, или это невозможно в принципе?

Отзыв ведущей организации ИО РАН

В отзыве имеются следующие замечания:

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 $\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}$ (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.

На автореферат диссертации поступило 5 положительных отзывов.

1. В отзыве **Данилова Сергея Давыдовича**, кандидата физико-математических наук, профессора, заместителя руководителя секции динамики климата Института Альфреда Вегенера, Бремерхафен, Германия, замечаний не содержится.
2. В отзыве **Степаненко Виктора Михайловича**, доктора физико-математических наук, заместителя директора НИВЦ МГУ, **содержатся следующие замечания:**

- 1) Стр. 11 автореферата. Неясно, как выбиралась ширина тестового фильтра в модели самоподобия масштабов, как влияет отношение ширин основного и тестового фильтра на результаты модели
- 2) Стр. 14 автореферата. Неясен смысл введения параметра ϵ_{diss} в уравнении на подсеточную ТКЭ (9); выходит, что обратный каскад энергии учитывается одновременно в первых двух слагаемых правой части; возможно ли получить удовлетворительные результаты модели, полагая $\epsilon_{diss} = 1$ и подбирая ϵ_{back} ?

3. В отзыве **Платова Геннадия Алексеевича**, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере ИВМиМГ СО РАН **содержатся следующие замечания:**

Из автореферата не очень понятно, как с помощью процедуры релаксации удалось установить, что перераспределение энергии происходит на масштабе бароклинной неустойчивости и какие дополнительные настройки нужно производить в рамках стохастической модели. Не приводятся детали, так называемой, «эталонной» модели, из-за чего непонятно с чем мы сравниваем результаты параметризаций ОПКЭ. Отсутствует описание эксперимента по моделированию баротропной неустойчивости, каковы параметры моделируемого струйного течения по отношению к пространственным и временным масштабам.

В отзыве отмечено: «Тем не менее, указанные недочеты не уменьшают достоинства представленной работы».

4. В отзыве **Дианского Николая Ардальевича**, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, **содержатся следующие замечания:**

- 1) Первые четыре из шести глав диссертации посвящены проблемам подсеточных параметризаций двумерной баротропной жидкости в

периодических областях, что более важно для общей циркуляции атмосферы. Собственно посвященными океану являются только последние две главы. Это можно было бы отразить и в названии диссертации, добавив в конце «и атмосферы».

2) Оператор диссипации для векторного поля представляет собой дивергенцию тензора напряжений, компоненты которого должны быть инварианты по отношению к операции поворота и, как следствие, равняться нулю для поля скорости, представляющего твердотельное вращение. В случае же замены сложного оператора вязкости на скалярный аналог, что и сделано в уравнении (8), когда оператор диффузии применяется независимо к каждой из составляющей скорости, условие отсутствия диссипации на твердотельном вращении будет в общем случае нарушаться. Поэтому предложенная здесь параметризация обратного перераспределения кинетической энергии с помощью модели отрицательной вязкости в комбинации с бигармонической вязкостью в уравнении на горизонтальную компоненту скорости требует доработки.

3) Вызывает недопонимание, почему автор испытал предложенные параметризации только для зарубежной модели NEMO, не сделав попытки их применения для модели океана, используемой в качестве океанического модуля в российской модели земной системы INMCM, разработанной в ИВМ РАН – в организации где работает соискатель, также участвующей в международной программе CMIP.

В отзыве отмечено: «Однако высказанные замечания никоим образом не снижают научную и практическую ценность представленной работы».

5. В отзыве **Крупчатникова Владимира Николаевича**, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника ИВМиМГ СО РАН, **замечаний не содержится.**

В целом, в присланных отзывах отмечается, что полученные в работе результаты опубликованы в реферируемых журналах, в том числе входящих

в список ВАК по профилю специальности и в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, и доложены на российских и международных конференциях. Работа написана физически, математически и технически грамотно, хорошим литературным языком. Диссертационная работа по своему научному уровню и совокупности полученных результатов отвечает критериям, установленным Положением ВАК о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широко известной компетенцией в вопросах численного моделирования турбулентных течений, геофизической гидродинамики и численного моделирования океана, что подтверждается многочисленными научными публикациями.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований получены следующие основные результаты:

1. Показано, что отсутствие численных аналогов законов сохранения приводит к неправильному формированию обратного каскада энергии для течений двумерных жидкостей: отсутствие закона сохранения интегральной завихренности приводит к ложному каскаду энергии в масштаб, определяемый размером области, а отсутствие закона сохранения энтропии приводит к ослаблению обратного каскада энергии.
2. Показано, что для воспроизведения спектрального притока энергии от подсеточных сил, можно использовать модель отрицательной вязкости, стохастическую модель и модель подобия масштабов. Выявлены преимущества и недостатки каждой из моделей.
3. Показано, что подсеточные параметризации способны ускорять переход к турбулентному режиму при моделировании баротропной неустойчивости струйного течения. Механизм работы подсеточных моделей различный: параметризация отрицательной вязкости

препятствует сглаживанию среднего течения; модель подобия масштабов увеличивает инкременты роста неустойчивых мод; стохастическая параметризация возбуждает неустойчивые моды.

4. Предложены стохастический и детерминистический подходы к моделированию ОПКЭ в примитивных уравнениях океана. Обе параметризации восстанавливают уровень вихревой энергии, вихревой меридиональный поток тепла и меридиональную опрокидывающую циркуляцию.
5. Реализован новый подход к анализу неразрешаемых на грубой сетке нелинейных взаимодействий для модели NEMO. Показано, что характерный пространственный масштаб ОПКЭ определяется масштабом бароклинной неустойчивости, модель отрицательной вязкости верно воспроизводит спектральную плотность возвращения кинетической энергии, а стохастическая параметризация требует настройки радиуса пространственной корреляции случайного поля.
6. Разработан комплекс программ, предназначенный для анализа подсеточных сил и построения параметризаций ОПКЭ в гидродинамических моделях двумерной и квазидвумерной турбулентности. Эти программы внедрены в модель океана NEMO и использованы для проведения представленных в диссертации расчетов и статистической обработки результатов моделирования.

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что в работе диссертанта проведен систематический анализ численного моделирования квазидвумерных турбулентных течений. Выявлена роль численных дискретизаций в формировании крупномасштабных когерентных структур и инерционного интервала обратного каскада энергии. Проведен анализ неразрешаемых нелинейных взаимодействий с учетом численных дискретизаций и предложены схемнозависимые параметризации ОПКЭ. Предложенная методология применена к модели океана NEMO и показана эффективность построенных параметризаций ОПКЭ.

Практическое значение результатов исследования заключается в том, что предложенные соискателем параметризации ОПКЭ и реализующий их комплекс программ включены в численную модель динамики океана NEMO, что позволяет проводить расчеты циркуляции океана при грубом разрешении и при этом получать решения, по своему качеству сопоставимые с результатами модели более высокого пространственного разрешения. Таким образом, реализованные параметризации позволяют существенно уменьшить вычислительные затраты. Особенности программной реализации и описание подхода представлены в статье [7]. 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 существующих численных моделей океана.

Достоверность изложенных в диссертационной работе результатов обеспечивается проверкой предложенных параметризаций на тестовых задачах, включающих в себя проведение прямого численного моделирования идеализированных двумерных турбулентных течений, а также согласованностью полученных результатов с известными теоретическими моделями и результатами вычислительных экспериментов, опубликованными другими авторами.

Личный вклад соискателя состоит в разработке комплекса программ, предназначенного для проведения априорного анализа подсеточных сил и параметризации ОПКЭ в гидродинамических моделях двумерной и квазидвумерной турбулентности, проведении расчетов и анализе результатов

моделирования. Все положения, выносимые на защиту, получены лично автором

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация соискателя Пережогина Павла Александровича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальных практических задач на основе использования современных методов прикладной математики и информационных технологий и вносящую существенный вклад в развитие методов численного моделирования циркуляции океана. На заседании 10 июня 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Пережогину Павлу Александровичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них - 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя

диссертационного совета Д 002.024.03

В.Ф. Тишкин

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.024.03

М.А. Корнилина

10 июня 2021 года