

Отзыв

**официального оппонента д.ф.-м.н. Курганского М.В. на диссертационную работу
Пережогина Павла Александровича**

**«Стохастические и детерминистические подсеточные параметризации для
двумерной турбулентности и их применение в моделях циркуляции океана»,
представленную в диссертационный совет Д002.024.03 на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 –
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»**

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Пережогина Павла Александровича посвящена численному исследованию двумерной турбулентности и построению на этой основе схем подсеточной параметризации для квазидвумерной турбулентности в численных моделях геофизической гидродинамики с акцентом на численные модели циркуляции океана. Тематика эта весьма актуальна, поскольку до сих пор существующее в глобальных численных моделях циркуляции океана пространственное разрешение недостаточно для адекватного описания мезомасштабных вихревых процессов. Эти процессы все еще остаются квазидвумерными и на них приходится значительная доля завихренности (энстрофии), так что они существенно влияют на те более крупные масштабы движения, которые явно разрешаются в численных моделях. Безусловно, что с ростом вычислительных возможностей граница между явно воспроизводимыми в моделях вихревыми процессами и теми, что явно не воспроизводятся, но обязаны учитываться, будет смещаться в сторону меньших масштабов. Однако, проблема «подсеточных» замыканий, что ставится и исследуется в данной работе, будет еще долгое время актуальной и востребованной, поскольку прямое численное моделирование (direct numerical simulation, DNS) геофизических процессов на глобальном уровне останется практически нереальной задачей. Тематика диссертации имеет отношение и к проблеме численного моделирования циркуляции атмосфер быстро вращающихся планет-гигантов, таких как Юпитер и Сатурн, где имеется определенное сходство с циркуляцией Южного океана и прямое численное моделирование также нереально.

Структура и основное содержание работы

Работа состоит из шести глав, введения и заключения, списка литературы из 158 наименований, а также четырех приложений. Основное содержание диссертации представлено на 152 страницах, включая 49 рисунков и 9 таблиц.

В диссертации нет обзорной главы и поэтому достаточно подробный обзор по теме диссертации, с анализом 86 литературных источников, приведен в начале введения на стр. 5-17. После этого во введении кратко характеризуется актуальность диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, описываются методы исследования, обосновывается научная новизна работы, подтверждается достоверность изложенных в работе результатов, указывается теоретическая и практическая значимость работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту. Также описывается апробация работы, перечисляются публикации по теме диссертации, характеризуется личный вклад диссертанта, описывается объем и структура диссертационной работы, кратко перечисляется ее содержание, выражаются благодарности физическим лицам и организациям.

Первая глава диссертации теоретическая. В ней исследуются статистические свойства конечномерных аппроксимаций уравнений, которые описывают динамику двумерной идеальной жидкости и принадлежат классу систем гидродинамического типа, введенных А.М. Обуховым. Решаются три основные задачи. Во-первых, исследование распределения завихренности по площадям, как оно воспроизводится различными конечно-разностными аппроксимациями указанных выше уравнений. Во-вторых, исследование когерентных структур, воспроизводимых этими аппроксимациями. В-третьих, сравнение этих когерентных структур с теми, что возникают в вязкой жидкости со случайным форсингом. Используются три схемы Аракавы: первая сохраняет энергию (схема E), вторая энстрофию (квадрат завихренности) (схема Z), третья как энстрофию, так и энергию (схема ZE). В частности, в главе показано, что с течением времени во всех трех схемах устанавливается гауссово распределение завихренности по площадям. Однако, если для схем Z и ZE распределения практически тождественны, то для схемы E наблюдается гораздо более высокая дисперсия завихренности, т.е. гауссова кривая гораздо более «размазана». Сделан вывод о том, что в схеме E возможна неограниченная генерация энстрофии, как следствие равномерного распределения энергии в Фурье-пространстве. Схемы Z и ZE практически равноценны. При применении обеих этих схем образуются крупномасштабные, имеющие характерный размер, сравнимый с размером расчетной области, когерентные структуры. Построение диаграмм рассеяния (scatter diagrams) показывает, что функция тока и завихренность связаны почти линейной зависимостью (с небольшими загибами на краях). На примере схемы ZE рассмотрен эффект линейного (релеевского) трения на блокировку обратного каскада энергии. Показано, что при большом коэффициенте релеевского трения не наблюдается крупномасштабных когерентных структур. Напротив, при малом коэффициенте релеевского трения такие структуры, близкие к тем, что в идеальной жидкости, уже наблюдаются и диаграммы рассеяния «функция тока – завихренность» оказываются схожими с теми же, что и для идеальной жидкости. В обоих случаях, распределения завихренности по площадям близки к гауссовому и похожи друг на друга, что видимо не случайно, поскольку «центр тяжести» поля завихренности приходится на большие волновые числа, и это поле мало чувствительно к значениям коэффициента релеевского трения.

Во второй главе диссертации исследуется влияние различных схем адвекции, а также различных сценариев задания внешнего воздействия (форсинга): или крупномасштабного, или же мелкомасштабного. В последнем случае при огрублении пространственного разрешения ярко проявляется недостаток конечно-разностных схем, сохраняющих только энергию. Применительно к полулагранжевым схемам получен важный вывод о том, что несохранение интегральной завихренности может вести к избыточной генерации энергии в крупных масштабах и серьезным нарушениям энергетического баланса в системе.

Третья глава диссертации открывает серию глав более технологического характера и посвящена параметризации эффекта подсеточных сил, которые осуществляют перераспределение энергии по масштабам и участвуют в поддержании обратного каскада энергии. Имеется в виду задача моделирования однородной изотропной двумерной турбулентности. Это построение предваряется априорным анализом действия подсеточных сил на траектории DNS-расчета при высоком пространственном разрешении. Таких параметризаций анализируется четыре: стохастическая параметризация, основанная

на рассмотрении авторегрессионного процесса первого порядка; параметризация отрицательной вязкости; модель подобия масштабов; комбинированная параметризация: стохастическая + модель подобия масштабов. На этой основе в диссертации проведены численные эксперименты с моделями грубого разрешения с целью сопоставления эффективности каждой из указанных выше параметризаций.

Четвертая глава диссертации нацелена на исследование влияния подсеточных параметризаций на воспроизведение баротропной неустойчивости струйных течений. В отличие от предыдущей главы, все параметризации построены без использования преобразования Фурье. В главе путем проведения численных экспериментов выполнен сравнительный анализ действия параметризаций подсеточной двумерной турбулентности (модель отрицательной вязкости, стохастическая модель, модель подобия масштабов) на среднее течение и отклонения от него.

В пятой главе подсеточные параметризации детально рассматриваются для примитивных уравнений на основе модели океана NEMO в модельной конфигурации Double Gyre. Речь идет об улучшении результатов моделирования на так называемых «вихредопускающих» моделях, которые лишь частично разрешают масштаб бароклинной неустойчивости (внутренний радиус деформации Россби). В качестве подсеточных параметризаций используются модель отрицательной вязкости и стохастическая параметризация. Эффекты параметризаций обсуждаются в контексте вихревого потока тепла, средней меридиональной «опрокидывающей» циркуляции, временной изменчивости в терминах спектров вихревой кинетической энергии, хотя физическое объяснение полученным спектрам не дается.

Шестая, вновь достаточно технологичная, глава дополняет и расширяет главу 5 в том, что в ней для модели океана NEMO в конфигурации Double Gyre проведен спектральный анализ притока кинетической энергии от подсеточных сил в модели высокого пространственного разрешения и проведено сравнение с притоками, формируемыми построенными подсеточными параметризациями на более грубой сетке.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Наиболее важные результаты диссертации

1) Проведено детальное численное моделирование двумерных уравнений идеальной жидкости и независимым методом еще раз показано то преимущество, которым обладают схемы, точно сохраняющие энтрофию; при этом дополнительное точное сохранение в схеме энергии имеет второстепенное значение.

2) Исследовано влияние численных аппроксимаций уравнений на обратный каскад энергии в вынужденной турбулентности в двумерной жидкости. Вслед за важностью сохранения энтрофии в численной схеме (при отсутствии диссипации и форсинга) доказана важность сохранения интегральной завихренности. Его несоблюдение ведет к ложному накоплению энергии на крупных масштабах.

3) Создан комплекс параметризаций обратного перераспределения кинетической энергии, который с успехом применен как к задаче обеспечения адекватного обратного каскада энергии в однородной изотропной двумерной турбулентности, так и к задаче адекватного описания свойств баротропной неустойчивости струйных течений при использовании численных моделей с таким пространственным разрешением, что возникает необходимость параметризации подсеточных сил.

4) Авторская методика с успехом применена в реальной модели океанической циркуляции NEMO. Здесь с использованием авторских параметризаций подсеточных сил удалось воспроизвести такие важные характеристики океанической циркуляции, как меридиональный поток тепла, интенсивность «опрокидывающей» (overturning) циркуляции, временную изменчивость в терминах спектров вихревой кинетической энергии.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Автором проведена большая работа по подготовке обзора известных подходов к численному моделированию двумерных течений жидкости и к расчету, в рамках такой модели, обратного перераспределения кинетической энергии, что подтверждается списком использованных литературных источников. Тем самым обеспечена хорошая основа для выполнения собственных исследований. Корректное использование этой основы в совокупности с анализом большого объема выполненных диссертантом численных расчетов свидетельствует об обоснованности научных положений и выводов, приведенных в диссертационной работе. Достоверность результатов диссертации подтверждена сравнением с выводами других авторов, а также соблюдением базовых физических и иных научных принципов.

Практическая значимость полученных результатов

Диссертационная работа имеет практическое значение, в первую очередь для учреждений, занимающихся моделированием океанической циркуляции в условиях, когда, по вынужденности, пространственное разрешение моделей недостаточно для адекватного воспроизводства всего спектра энергонесущих мезомасштабных вихрей в океане. Полученные результаты принесут пользу всем тем, кто занимается численным моделированием двумерной турбулентности.

Замечания по диссертационной работе

Диссертация написана физически, математически и технически грамотно, хорошим литературным языком. Однако у меня есть замечания (комментарии) к тексту, которые перечислены ниже.

1. На стр. 27 в плане схемы, сохраняющей энергию и энтрофию, 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 «бездивегрентная» часть спектрального потока энтрофии столь незначительна?

23. Стр. 112. Заключительная фраза на этой странице: «Прямой каскад энергии обязательно должен существовать, так как он связан с прямым каскадом энтрофии». 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?

Заключение

Высказанные замечания не снижают общего хорошего впечатления о диссертационной работе. В ней получены результаты, во многом проливающие свет как на те фундаментальные закономерности двумерной турбулентности, что могут быть выявлены путем эффективного численного моделирования, так и на возможность воспроизводства свойств квазидвумерных потоков, включая океанические, путем параметризации воздействия подсеточных вихревых процессов на более крупномасштабные компоненты движения. Автор является высококлассным специалистом в области численного моделирования, обладает интуицией, которую необходимо иметь при проведении численных экспериментов.

Диссертационная работа Пережогина П.А. представляет собой завершенное научное исследование, содержащее новые подходы к построению и анализу подсеточных параметризаций мезомасштабной вихревой активности в современных моделях океана. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Материалы исследования детально изложены в 8 опубликованных работах. Из них 4 работы опубликованы в журналах из списка ВАК по профилю специальности. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Считаю, что как по объему, так и по содержанию диссертационная работа «Стохастические и детерминистические подсеточные параметризации для двумерной турбулентности и их применение в моделях циркуляции океана» полностью отвечает критериям, установленным Положением ВАК о порядке присуждения ученых степеней и предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе пункту 9 этого Положения, а ее автор, Пережогин Павел Александрович, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
Лаборатории геофизической
гидродинамики Отдела динамики
атмосферы
ИФА им. А.М. Обухова РАН



Курганский Михаил Васильевич
«27» апреля 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук»
Почтовый адрес: 119017, г. Москва, Пыжевский пер. 3
Официальный сайт: <http://ifaran.ru>
E-mail: kurgansk@ifaran.ru
Рабочий телефон: +7(495)959-41-03

Подпись Курганского М.В. заверяю
ученый секретарь
ИФА им. А.М. Обухова РАН,
кандидат географических наук




Л.Д. Краснокутская