

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук

Дружинина Олега Александровича

на диссертационную работу Дебольского Андрея Владимировича «Турбулентный обмен в пограничном слое атмосферы: параметризации на основе вихреразрешающих и осредненных по Рейнольдсу моделей», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате.

Диссертационная работа Дебольского Андрея Владимировича посвящена исследованию динамики стратифицированного атмосферного пограничного слоя при различных типах температурной стратификации, от неустойчивой до сильно-устойчивой, на основе разработки новых параметризаций мелкомасштабных турбулентных потоков импульса и тепла и внедрения этих параметризаций в крупномасштабные математические модели общей циркуляции атмосферы. Поскольку атмосферный пограничный слой играет ключевую роль в формировании глобального и регионального климата, прогноз его динамики на основе вычислительно-эффективных параметризаций и их включений в современные климатические модели представляет собой важную задачу, что и обуславливает **актуальность темы** диссертационной работы.

Поскольку параметризации потоков непосредственно связаны с процедурой замыкания по Рейнольдсу, они предполагают введение эмпирических констант, количественное определение которых, строго говоря, возможно лишь сравнением результатов предсказаний модели с данными натурных и лабораторных экспериментов. В применении к моделям Земной системы, к сожалению, таких данных недостаточно, они слишком разрознены в пространстве и времени, особенно в полярных широтах, и приходится прибегать либо к данным реанализов, либо к сравнению с предсказаниями других численных (LES-) моделей более высокого разрешения. Этот подход и используется диссертантом в купе с адаптацией разрабатываемых параметризаций для их реализации в рамках климатической модели Земной системы, разрабатываемой в ИВМ им. Г.И. Марчука РАН.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1) Модифицирована интегральная модель конвективного атмосферного пограничного слоя, где использован масштаб скорости, учитывающий как приповерхностную скорость трения, так и среднюю скорость ветра в погранслое.

Проведено вихреразрешающее численное моделирование атмосферного пограничного слоя для случаев свободной конвекции и сдвигово-конвективного режима, на основе данных которого оценены коэффициенты, при которых модель корректно воспроизводит рост высоты и коэффициент вовлечения пограничного слоя.

2) Показано, что известные замыкания первого порядка, предполагающие линейность по параметру устойчивости безразмерного градиента скорости, в целом согласуются с данными и результатами расчетов вихреразрешающего моделирования устойчиво-стратифицированных пограничных слоев. С другой стороны, в пределе сильно-устойчивой стратификации, замыкания, предполагающие независимость безразмерных градиентов от динамической скорости, точнее воспроизводят результаты LES.

3) В модели Земной системы (МЗС) ИВМ РАН реализована модель замыкания турбулентных потоков импульса и тепла, учитывающая их зависимость от градиентного числа Ричардсона. Значения модельных коэффициентов оптимизированы сравнением с результатами тестовых LES-расчётов устойчиво-стратифицированного атмосферного погранслоя. С использованием модели проведены расчёты и сравнение среднеклиматических полей, годового хода, и зонально-осредненных зависимостей приземных метеовеличин с данными реанализов (R2 DOE, ERA-5) и предыдущих версий модели.

Достоверность полученных результатов основана на использовании физически обоснованных турбулентных замыканий, открытых баз данных, апробированных, запатентованных численных алгоритмов ЭВМ, используемых в диссертационной работе. Результаты исследования не противоречат известным результатам, полученными ранее другими авторами, опубликованы в рецензируемых статьях в профильных журналах.

Практическая значимость полученных результатов определяется разработанной параметризацией турбулентного перемешивания, внедренной в модель Земной системы ИВМ РАН, позволяющей улучшить воспроизведение динамики современного климата и качества климатических и сезонных гидрометеорологических прогнозов.

Общий объём диссертации составляет 100 страниц и включает довольно подробное введение с общим описанием тематики и конкретно решаемых задач, их новизны и актуальности, и четыре главы с описанием методов вычислений и замыканий и полученных результатов, и их заключения, дополненные списками литературы, таблиц, рисунков и условных обозначений.

Общее замечание по содержанию диссертации:

При описании расчётов вихреразрешающего моделирования (LES) в диссертации употребляется выражение «численный эксперимент» (с.8.и т.д.). Обычно под численным

экспериментом понимают проведение прямого численного моделирования (DNS), где, в отличие от LES, уравнения гидродинамики решаются без применения каких-либо гипотез замыкания. По сути, значение диссертационной работы скорее можно определить как приведение в соответствие (сшивку) моделей низкого (типа RANS) и относительно высокого (LES) разрешения при помощи калибровки модельных констант в RANS по данным расчётов LES.

Замечания по тексту диссертации:

1. **Введение:** формулировка основных положений, выносимых на защиту, выглядит весьма неконкретно (с.9 диссертации и с.6 автореферата). Например, в п.1 утверждается, что интегральная модель воспроизводит высоту и коэффициент вовлечения пограничного слоя. При этом неясно, что же здесь имеется ввиду - натурно наблюдаемые значения или результаты LES? Последующие пункты также неконкретны - несколько раз повторяется «... улучшают, позволяет улучшить ...». Неясно, по сравнению с чем наблюдается это улучшение — точнее воспроизводятся натурно наблюдаемые характеристики атмосферного погранслоя или имеется в виду соответствие с результатами расчётов LES?

2. **Раздел 2:** Следовало бы больше внимания уделить описанию постановки задачи LES (с.28, 29,30). В частности возникают вопросы, какие именно уравнения решались (1.24-26), как задавался ветер (градиент давления или граничное условие Дирихле), каким натурным условиям соответствуют задаваемые граничные значения для потоков H_s , B_s ? Также неясно, как проводится процедура усреднения.

В подписи к рис. 2.1 (с.21, см также рис. 1 на с. 9 автореферата) фигурируют профили, осредненные по времени по данным LES расчетов. Неясно, насколько такое осреднение оправдано в условиях изменяющегося во времени течения (т.к. высота погранслоя постоянно растёт). По этому рисунку (рис. 2.1) также непонятно, почему поток плавучести меняет знак внутри конвективного слоя ($B < 0$ при $z < h$). Следовало бы также пояснить, почему на этом рисунке *турбулентный* поток импульса в LES отличен от нуля в области выше конвективного слоя (при $z > h+1$). Поскольку в этой области сдвиг скорости отсутствует, и температура с высотой растёт, неясно, как поддерживается статистически стационарная турбулентность.

3. **Раздел 3:** Как показывает Рис. 3.1 (с.49, см. также рис. 3 в автореферате) согласно данным LES-расчётов турбулентное число Прандтля Pr_t слабо зависит от градиентного числа Ричардсона Ri_g , оставаясь примерно постоянным (меняясь в интервале от 0.75 до 1) с ростом Ri_g от 0 до 0.4. Как это согласуется с утверждением о линейном росте Pr_t с

устойчивостью (погранслоя) в п.2 основных результатов в диссертации (с.73) и автореферате (с. 19)?

4. Раздел 4: В диссертации отмечается, что оптимизация модельных констант дает незначительные улучшения в воспроизведении климата (с.65), не даёт улучшения при воспроизведении высоты погранслоя (с. 67), и что эксперименты с дополнительно оптимизированными параметрами замыкания, не показывают значимого улучшения относительно версии модели (*Esau & Byrkjedal, 2007* или EB) с оригинальными константами (с.70). Возникает вопрос, насколько оправданным является положение 3 (с.9 и с.6 автореферата), где утверждается, что калибровка параметров модели замыкания (по-видимому, имеется ввиду модель EB) позволяет улучшить результаты моделирования атмосферного пограничного слоя Земной системы.

5. Другие замечания по тексту:

- с.17: При описании замыканий подсеточных потоков в LES модели не указано, как замыкается подсеточный поток тепла h в (1.28).
- с.70: По-видимому, подпись к рис. 4.6 ему не соответствует (скопирована с рис. 4.5, с.69).
- с.71 (Заключение): Неясно, что понимается под формулировкой «безразмерный градиент линейной скорости» (видимо, опечатка).

Следует отметить также некоторую небрежность оформления диссертации (с. 14 повтор нумерации формул (1.14)-(1.16) vs. (1.17)-(1.19), отсутствие формул с. 60 (4.2), многочисленные опечатки, отсутствие знаков пунктуации, путаница в обозначениях (например, в главе 2 Λ - амплитуда волны (с. 24). в главе 3 это и масштаб Обухова (с 42) и т.д.).

В автореферате имеются несоответствия с изложением в диссертации, в частности, неточности (видимо, опечатки) в описании содержания 4й главы. Например, оптимизация констант модели замыкания в диссертации обсуждается в разделе 4.2 (с.61), в то время, как в автореферате указан раздел 4.3. Указанного в автореферате раздела 4.3.2 (с.17) в диссертации нет.

Сделанные замечания, тем не менее, не снижают общую высокую оценку данной работы и полученных результатов.

Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне и представляет собой законченный научный труд. Содержание диссертации полностью соответствует

паспорту по специальности 1.6.18 – науки об атмосфере и климате. Автореферат в целом соответствует содержанию, достаточно полно отражает структуру диссертации и дает возможность сделать заключение о ее высоком научном уровне. Основные положения диссертации опубликованы в научных изданиях. Список публикаций по теме диссертации содержит 16 работ, включая 6 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК, WoS и Scopus. Результаты работы докладывались на многочисленных российских и международных конференциях. Имеются два свидетельства о гос. регистрации программ для ЭВМ.

Таким образом, диссертация Дебольского Андрея Владимировича «Турбулентный обмен в пограничном слое атмосферы: параметризации на основе вихререзающих и осредненных по Рейнольдсу моделей», соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» утвержденных постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013г. №842, предъявляемых к диссертационным работам на соискание степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 – науки об атмосфере и климате.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией ИПФ РАН

Доктор физико-математических наук

603950, г. Н.Новгород, ул. Ульянова, д.46, ИПФ РАН

e-mail: druzhinin@ipfran.ru, тел: +7 (831) 4164760

27 ноября 2025г.

Дружинин О.А.

Я, Дружинин Олег Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

27 ноября 2025

Дружинин О.А.

«Подпись _____, заведующий лабораторией ИПФ РАН Дружинина Олега Александровича
удостоверено _____ в отделе _____ О.А. Дружинин»



27.11.2025г.