

Отзыв

официального оппонента Перова Вениамина Леонидовича о диссертационной работе Дебольского Андрея Владимировича “Турбулентный обмен в пограничном слое атмосферы: параметризации на основе вихреразрешающих и осредненных по Рейнольдсу моделей”, представленной к защите 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 (АПС) и разработке параметризаций турбулентного обмена для крупномасштабных моделей общей циркуляции атмосферы. В работе решались следующие задачи: диагностики и прогноза высоты конвективного пограничного слоя с использованием интегральных моделей конвективного пограничного слоя атмосферы, их верификация по данным вихреразрешающего моделирования; воспроизведения турбулентного перемешивания при устойчивой стратификации атмосферы с использованием турбулентных замыканий первого порядка на основе локального обобщения теории подобия Монина-Обухова (ТПМО); Разработка и внедрение в модели Земной системы локально одномерной модели турбулентного перемешивания в атмосферном пограничном слое.

Актуальность темы диссертации

Представленная диссертационная работа посвящена решению важной научно-практической проблемы - улучшению климатической модели ИВМ РАН для воспроизведения современного климата и сезонных прогнозов погоды.

Научная новизна

Научная новизна работы убедительно продемонстрирована в тексте и заключается в следующем:

Разработана численная реализация, оценены и верифицированы по данным вихреразрешающего моделирования параметры интегральной модели конвективного пограничного слоя атмосферы.

Выполнено исследование набора замыканий первого порядка в формализме локального обобщения ТПМО для слабо и сильно устойчиво стратифицированного пограничного слоя атмосферы.

В климатическую модель ИВМ РАН внедрена обновленная версия схемы турбулентного переноса в АПС.

Достоверность результатов подтверждается публикациями в авторитетных профессиональных изданиях, регистрацией результатов интеллектуальной деятельности, выступлениями автора на научных конференциях.

Личный вклад автора адекватно представлен в тексте диссертации и реферата, где отражено участие автора и даны корректные ссылки на предыдущие исследования. Все вынесенные на защиту положения и научные результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором. Автору принадлежит ведущая роль в

постановке задач, подготовке научных публикаций и докладов на конференциях, симпозиумах, семинарах.

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели и задачи, обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость, а также формулируются выносимые на защиту положения.

В **Первой главе** представлено описание параметризаций турбулентного перемешивания в АПС и обзор способов их тестирования и валидации с помощью данных численных экспериментов с вихреразрешающими моделями. Приводится общее описание формулировки параметризаций турбулентного переноса и одноколоночной (одномерной) системы уравнений АПС, которая далее в работе используется для проведения численных расчетов. Так же, описывается используемая в МЗС ИВМ РАН параметризация и особенности ее реализации. Дается описание методов вихреразрешающего моделирования и детали используемых в данной работе LES (Large-Eddy Simulation) моделей, разрабатываемых в НИВЦ МГУ и ИВМ РАН.

Вторая глава посвящена исследованию аналитических интегральных моделей конвективного пограничного слоя (КПС). Приводится формулировка интегральных моделей "нулевого" порядка и их Основу интегральных моделей КПС составляет интегрированное по высоте КПС уравнение притока тепла в приближении горизонтальной однородности. Для получения эволюционного уравнения для коэффициента вовлечения, используется интегральное уравнение баланса кинетической энергии турбулентности (КЭТ). Автором диссертации был проведен ряд численных экспериментов, в которых КПС развивался под действием постоянного по времени и горизонтали положительного потока тепла на подстилающей поверхности. Из внешних параметров экспериментов варьировались значения устойчивости свободной атмосферы (для более надежной оценки членов связанных с выносом энергии гравитационным волнами), скорость ветра и шероховатость. Так же во второй главе обсуждаются результаты численных экспериментов и тестирования полученной интегральной модели КПС.

Третья глава посвящена исследованию эффективных замыканий первого порядка для устойчивой стратификации. Приводится обзор основных проблем воспроизведения устойчивого АПС локально одномерными моделями, формулируется исследуемый класс замыканий первого порядка, а также их связь с локально-обобщенной ТПМО. Значительный набор универсальных функций (УФ), предложенных в литературе, автор делит на несколько групп исходя из их функциональной формы и асимптотик. Основными категориями различия при этом является функциональная форма безразмерного градиента скорости и поведение турбулентного числа Прандтля Prt в пределе сильной устойчивости.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации. Результаты диссертации изложены в 15 работах автора, 6 из которых - статьи опубликованные в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 6 публикаций в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 8 - в тезисах докладов, оформлено 2 свидетельства РОСПАТЕНТА о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Основные замечания к работе:

Ряд замечаний носит скорее редакционный характер. Нет соответствия в расположении материала в диссертации и в автореферате диссертации. Так, в автореферате написано, что в разделе 1.2 описывается используемая в МЗС ИВМ РАН параметризация, а в диссертации в разделе 1.2 описываются вихреразрешающие модели пограничного слоя атмосферы. Замечено несколько таких несоответствий.

В формуле (1.22) отсутствует индекс по времени для вертикального коэффициента турбулентности.

В подписи к рис. 2.1 есть неточности.

На странице 19 вместо перепада плавучести лучше использовать скачок потенциальной температуры. По крайней мере, так написано в статье Tennekes H. на которую ссылается диссертант.

Замечания по существу:

1. Описание турбулентности в современных моделях прогноза погоды является важной и не до конца решенной задачей. Основные трудности при решении этой задачи связаны с сильной нелинейностью уравнений. Различные неустойчивости в атмосфере приводят к появлению вихрей и волн, которые развиваются на разных пространственных и временных масштабах. Однако осреднения Рейнольдса уравнений Навье – Стокса, используемые в диссертации, не делают различия между масштабами, смешивая их вместе. В отличие от этого подхода, существует спектральный алгоритм, который учитывает зависимость атмосферных процессов от масштабов. Это квазинормальное исключение масштаба возмущения (QNSI), которое, например, используется для параметризации пограничного слоя атмосферы в модели прогноза погоды в Гидрометцентре России. И диссертанту следует обратить внимание на этот метод параметризации пограничного слоя, который хорошо проявил себя при параметризации устойчивых и сильно устойчивых ситуаций.

Представленные замечания не влияют на общее положительное впечатление от работы. В работе проведено исследование динамики стратифицированного атмосферного пограничного слоя атмосферы и разработаны параметризации турбулентности АПС для численных моделей общей циркуляции атмосферы.

Диссертационная работа Дебольского А.В. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на хорошем научном и техническом уровне. В работе приведены интересные и важные, с научной и прикладной точек зрения, исследования турбулентности в пограничном слое атмосферы. Включение предложенных автором в модель общей циркуляции атмосферы показало улучшение рассчитанных метеорологических полей в сравнении с данными наблюдений. Это открывает путь к практическому использованию предложенных параметризаций турбулентности в численных моделях прогноза погоды. Полученные автором результаты являются достоверными, а выводы и заключения обоснованными.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертационного исследования.

Диссертационная работа Дебольского Андрея Владимировича “Турбулентный обмен в пограничном слое атмосферы: параметризации на основе вихреразрешающих и

осредненных по Рейнольдсу моделей” является самостоятельной работой. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 1.6.18 - “Науки об атмосфере и климате” (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 года, а её автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 - “Науки об атмосфере и климате”.

Официальный оппонент:



Перов Вениамин Леонидович

Кандидат физико-математических наук по специальности 11.00.09 - метеорология, Старший научный сотрудник ВАК, Ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения Гидрометцентр России, 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1.

e-mail veniamin.perov@mail.ru

Тел. +7(906)741-00-11

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных и включение их в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук Дебольского А.В.

“4” декабря 2025 г.

Подпись В.Л. Перова заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения

Гидрометцентр России



Шестакова Наталья Анатольевна