

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ФГБУН «Институт вычислительной

математики и математической геофизики

Сибирского отделения

Российской академии наук»

доктор физико-математических наук,

профессор РАН



М.А. Марченко

4 декабря 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Дебольского Андрея Владимировича
«Турбулентный обмен в пограничном слое атмосферы: параметризации на основе
вихреразрешающих и осредненных по Рейнольдсу моделей»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.6.18. — «Науки об атмосфере и климате».

1. Актуальность работы

В настоящее время активно развиваются технологии численного моделирования и прогнозирования состояния атмосферы с использованием моделей высокого разрешения, учитывающих практически все известные физические процессы в атмосфере. Взаимодействие нижней атмосферы с подстилающей поверхностью происходит в пределах планетарного атмосферного пограничного слоя (АПС). Описание и параметризация процессов в АПС в таких моделях остаются недостаточно разработанными.

Характерная толщина АПС варьируется от ~100 м в условиях высокоустойчивой стратификации до нескольких километров в условиях развитой конвекции. Он способствует передаче импульса, тепла и влаги между поверхностью Земли и атмосферой. Это делает АПС ключевым элементом климатической системы Земли, обеспечивая прогнозы ключевых приземных метеорологических переменных, информация о которых является основным практическим результатом моделирования. Поэтому разработка более точных и вычислительно эффективных параметризаций АПС, пригодных для включения в климатические модели, является актуальной задачей, и данная работа направлена на её решение. Физические процессы в АПС параметризуются и формулируются в виде локально-одномерных моделей, основная цель которых — описание невоспроизводимой

явно «подсеточной» турбулентной динамики. Необходимость совместного моделирования процессов АПС и крупномасштабной атмосферной динамики накладывает свои ограничения на возможные параметризации турбулентного переноса. Поэтому разработка новых схем турбулентного переноса должна быть тесно связана с исследованиями по их применению в климатических моделях.

2. Краткий обзор содержания работы

Диссертационная работа А.В. Дебольского состоит из введения, 4 глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 100 страниц, включая 20 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 99 наименований.

Во введении обосновывается актуальность исследования, формулируется цель, дается обзор научной литературы по исследуемой проблеме, ставятся задачи работы, обосновывается научная новизна и практическая значимость, формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе описываются параметризации турбулентного перемешивания в АПС и методы их тестирования. В частности, формулируются параметризация турбулентного переноса и одномерная система уравнений АПС, используемые в численных расчетах, а также сравниваются с параметризацией, используемой в настоящее время в климатической модели ИВМ РАН. Также приводится описание используемых LES-моделей.

Во второй главе представлена формулировка интегральных моделей нулевого порядка и их вывод. Модели конвективного пограничного слоя (КПС) основаны на уравнении потока тепла, интегрированном по высоте в приближении горизонтальной однородности. Уравнение эволюции для коэффициента вовлечения выведено с использованием уравнения интегрального баланса для кинетической энергии турбулентности (КЭТ). Описаны численные эксперименты с моделью LES. Эта модель используется для оценки применимости различных приближений членов интегрального баланса КЭТ и других предположений, приводящих к системе уравнений интегральной модели. КПС эволюционировал под воздействием постоянного (по времени и горизонтальному направлению) положительного потока тепла на подстилающей поверхности при различных значениях устойчивости свободной атмосферы, скорости ветра и шероховатости. Результаты численных экспериментов подтвердили масштабируемость профилей КЭТ и его диссипации с использованием высоты КПС и масштаба Дирдорфа. Эксперименты со сдвиговой конвекцией показали, что в этом случае возможно построение интегральных моделей КПС в приближении нулевого скачка температуры и скорости на верхней границе.

В третьей главе рассматривается эффективность замыканий первого порядка для устойчивой стратификации, дается обзор основных проблем воспроизведения пограничного слоя с помощью локально-одномерных моделей и формулируется класс исследуемых замыканий первого порядка. Приводится описание универсальных функций

(УФ), предложенных в литературе. Подчеркивается, что основные различия заключаются в функциональной форме безразмерного градиента скорости и поведении турбулентного числа Прандтля в пределе сильной устойчивости. Выявляются области наибольшего соответствия УФ агрегированным данным LES-моделирования. Одномерные модели, использующие полученные замыкания, сравниваются с экспериментальными данными LES для условий слабой и сильной устойчивости.

В четвертой главе обсуждается реализация новых замыканий в климатической модели ИВМ РАН, обоснование их выбора и исследование их влияния на воспроизведение современного климата. Для последовательного анализа влияния нового замыкания были проведены сравнительные численные эксперименты по моделированию современного климата с использованием модели системы Земля ИВМ РАН для предыдущей и новой версий модели. Как видно, предложенное замыкание улучшает воспроизведение температуры поверхности, прежде всего в полярных регионах, где наблюдаются наиболее устойчивые пограничные слои. Аналогичные улучшения наблюдаются и в других полях поверхности без ухудшения облачности и осадков. Кроме того, охлаждение прибрежной Антарктиды приводит к увеличению градиента приземного ветра в Южном океане и усилению антарктического антициклона.

В заключении приведены основные результаты работы.

3. Научная новизна полученных результатов

К наиболее важным результатам работы Дебольского А.В., определяющим ее новизну и значимость, следует отнести следующие:

1. Создана новая модель пограничного слоя атмосферы, построенная с учетом результатов моделирования с подробным разрешением на основе LES модели.
2. Проведено исследование ряда турбулентных замыканий первого порядка для случаев слабоустойчивых и сильноустойчивых стратификаций в атмосферном погранслое.
3. Создана и внедрена новая версия турбулентного переноса в погранслое атмосферы в рамках модели климатической системы ИВМ РАН.

4. Практическая ценность работы

Результаты работы могут быть использованы при разработке или уточнении блоков параметризации физических процессов в пограничном слое атмосферы для современных атмосферных блоков моделей климатической системы Земли. Разработанный программный комплекс внедрен в МЗС ИВМ РАН.

5. Обоснованность и достоверность полученных результатов и сделанных выводов.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается их соответствием современным представлениям о природе атмосферного пограничного слоя

и результатам опубликованных работ по теме диссертации отечественных и зарубежных авторов.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты, полученные в диссертации, могут быть рекомендованными к использованию в учреждениях РАН, университетах и других учреждениях Российской Федерации, в которых проводятся исследования пограничных слоев атмосферы и климата Земли с помощью численного моделирования.

7. Замечания по работе

1. При формулировке вихреразрешающей модели 1.24-1.28 используется некоторая «фильтрация» вместо стандартного «среднего». Во-первых непонятно, что это такое, поскольку никаких объяснений для процедуры «фильтрации» не приводится. Во-вторых, из последующего изложения следует, что «фильтрация» не дает тождества следующего из стандартного определения «среднего», а именно, что двойное среднее тождественно одиночному среднему. Кроме того, определение для компонент турбулентного потока импульса $\tau_x = \overline{u'w'}$ и $\tau_y = \overline{v'w'}$, данное на странице 12, не будет совпадать с определением 1.27 так как, кроме этого, будет включать еще и слагаемые $\overline{uw'}$, $\overline{vw'}$, $\overline{u'w}$ и $\overline{v'w}$. И, в-третьих, насколько применима в этом случае теория однородной и изотропной турбулентности Колмогорова, лежащая в основе уравнений КЭТ и градиентных замыканий, тоже непонятно. Как минимум обсуждение этих вопросов хотелось бы видеть в диссертации.

2. В диссертации отсутствуют какие-либо пояснения, почему именно в качестве модели «образца» используются LES модели, почему RANS модели не могут быть использованы (как менее сложные) или DNS модели (как более подробные).

3. Текст диссертации трудно читаем, так как значительная часть обозначений в формулах не расшифровывается, очень часто используются многочисленные буквенные сокращения (в то числе и не вынесенные в список сокращений), слишком часто используются ссылки на работы вместо необходимых пояснений.

4. В тексте масса опечаток, повторений и неточностей. Например, в комментариях к рисунку 4.3 говорится о том, что «повышение температуры в Северном море связано со смещением среднеклиматической границы ледового покрова», тогда как на рисунке повышение наблюдается в Норвежском море, а ледового покрова не должно быть ни в одном, ни в другом море.

8. Общая характеристика диссертационной работы

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации А.В. Дебольского. Все представленные в диссертации результаты получены и проанализированы при непосредственном участии автора. Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию. Положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы и опубликованы соискателем в научной печати и материалах конференций. Общее количество печатных работ по теме диссертации 15, 6 из которых изданы в журналах, рекомендуемых ВАК. Материалы диссертации неоднократно докладывались на конференциях и симпозиумах, включая European Geoscience Union General Assembly, и European Meteorological Society Annual Meeting.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой и отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации 24 сентября 2013 г N2842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук. Ее автор Дебольский Андрей Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 – «Науки об атмосфере и климате».

Доклад А.В. Дебольского по материалам диссертационной работы заслушан и обсужден на общепланетарном семинаре ИВМиМГ СО РАН 12 ноября 2025 года.

Отзыв подготовил:

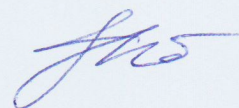
Заведующий лабораторией математического
моделирования процессов в атмосфере и гидросфере
ИВМиМГ СО РАН

д.ф.-м.н. специальность 25.00.29

«Физика атмосферы и гидросферы

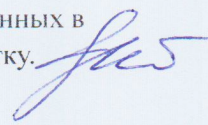
e-mail: plat@ommfao.ssec.ru,

телефон: +7 (383) 330-6450



Г.А. Платов

Я, Платов Геннадий Алексеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук. Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6. Факс: +7 (383) 330 87 83, +7 (383) 330 66 87. Телефон: +7 (383) 330 83 53. Электронная почта: contacts@ssec.ru. Интернет сайт: <https://icmmg.nsc.ru/ru>

Подпись Г.А. Платова заверяю

Ученый секретарь ИВМиМГ СО РАН к.ф.-м.н.



Л.В. Вшивкова