

На правах рукописи

Дебольский Андрей Владимирович

**Турбулентный обмен в пограничном слое атмосферы:
параметризации на основе вихреразрешающих и
осредненных по Рейнольдсу моделей**

Специальность 1.6.18 —
«Науки об атмосфере и климате»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Репина Ирина Анатольевна

Официальные оппоненты: **Дружинин Олег Александрович**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук”, заведующий лабораторией

Перов Вениамин Леонидович,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение “Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации”, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 24 декабря 2025 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.096.XX (24.1.130.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук по адресу: 119017, Москва, Пыжевский пер., 3, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА РАН и на официальном сайте ИФА РАН: <https://ifaran.ru/ru/about/dissertations>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119017, Москва, Пыжевский пер., 3, стр.1, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.096.XX (24.1.130.01), и в электронном виде *e-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru*.

Автореферат разослан " " октября 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.096.XX (24.1.130.01),
кандидат физико-математических наук

А.В. Чернокульский

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Планетарный атмосферный пограничный слой (АПС) представляет собой нижнюю часть атмосферы, взаимодействующую с подстилающей поверхностью Земли. АПС имеет характерную толщину в несколько километров, уменьшающуюся до высот ~ 100 м в условиях сильно устойчивой стратификации. В нем обеспечивается передача импульса, тепла и влаги между поверхностью Земли и атмосферой, турбулентный перенос и последующая диссипация кинетической энергии, что делает АПС одним из ключевых элементов климатической системы Земли. Хотя параметризация турбулентного переноса в АПС является лишь одним из компонентов численных моделей прогноза погоды и климата, она имеет особое значение для прогноза приземных метеовеличин, информация о которых является главным практическим результатом моделирования.

В моделях Земной системы (МЗС), прогноза погоды и климата численное моделирование атмосферы осуществляется с шагами сетки по горизонтали значительно превышающими толщину пограничного слоя. Поэтому физические процессы в АПС, параметризуются и записываются в виде локально-одномерных моделей, основной целью которых является перераспределение импульса, тепла и влаги по вертикали за счет невоспроизводимой явно "подсеточной" турбулентной динамики. Локально-одномерные модели строятся на основе статистического осреднения турбулентности по Рейнольдсу (RANS-метод). Наибольшее распространение в глобальных моделях атмосферы получили модели первого и второго порядка, соответствующие диагностическим и однопараметрическим RANS - замыканиям. Значительным преимуществом замыканий первого порядка является невысокая вычислительная сложность.

Характерной особенностью АПС является важная роль плотностной стратификации в формировании турбулентного обмена. Динамика АПС значительно связана с суточным циклом, вызванным нагревом поверхности лучистой энергией Солнца днем и выхолаживанием длинноволновой радиацией ночью, что обуславливает чередование устойчиво-стратифицированного и конвективного режимов АПС. Устойчивые пограничные слои также являются характерной особенностью полярных регионов, особенно в период полярной ночи, а неустойчивая стратификация характерна для многих районов океана, в частности, для энергоактивных зон и зон теплых течений. Наличие характерных режимов динамики АПС определяет различные требования для параметризации каждого из них в МЗС.

Устойчиво-стратифицированный пограничный слой атмосферы (УПС) характеризуется подавлением турбулентного обмена, ограничивающим его толщину. Характерные для глобальных моделей ошибки воспроизведения УПС связаны с недостаточным сеточным разрешением

по вертикали для воспроизведения тонких пограничных слоев. Разработчикам МЗС приходится соблюдать баланс при использовании схем параметризации АПС. С одной стороны, использование более точных и физически обоснованных схем, оцениваемых в основном по данным вихреразрешающего моделирования (LES – Large-Eddy Simulation), увеличивает обоснованность прогнозов погоды и климата. С другой стороны, необходимо выбирать схемы, которые лучше работают в совместном режиме с другими блоками климатической модели. Иногда эти цели противоречат друг другу. Например, локальная теория подобия Монина-Обухова (ТПМО) с линейными безразмерными градиентами скорости и температуры [1; 2], подтверждаемая многими данными LES [напр. А1; 3], предполагает так называемые "короткохвостые" функции устойчивости, то есть скорректированный по устойчивости турбулентный масштаб длины быстро уменьшается с ростом устойчивости. На грубых вертикальных сетках климатических моделей это вызывает эффект декаплинга, когда значимое радиационное выхолаживание и недостаточный турбулентный теплообмен с поверхностью приводят к завышенному охлаждению поверхности в ночное время [4]. Другим побочным эффектом недооценки перемешивания в АПС является некорректное воспроизведение поворота ветра с высотой и, как следствие, ошибки в воспроизведении динамики циклонов, в частности, в их времени жизни [5]. Для того чтобы избежать этих эффектов в моделях до сих пор широко используются так называемые "длиннохвостые" функции устойчивости [напр. 6; 7]. Они предотвращают декаплинг, но значительно завышают перемешивание и высоту АПС [5; 8; 9]. Еще одним механизмом поддержания турбулентности может быть увеличение числа Стэнтона (отношения динамической и термической шероховатостей) [А2], однако, характер этой зависимости может значительно отличаться для разных типов поверхностей [10].

Процессы в конвективном пограничном слое (КПС), с другой стороны, имеют определяющее влияние на формирования облачности, которая, в свою очередь, влияет на энергетический баланс поверхности. Потоки тепла и влаги на уровне конденсации, в значительной степени контролируемые ростом облаков, определяются динамикой слоя вовлечения в подоблачном КПС. На сетках с грубым вертикальным разрешением, используемых в моделях климата, большие градиенты метеовеличин в слое вовлечения значительно сглаживаются, что приводит как к ошибкам в определении потоков этих величин, так и динамики КПС в целом. Поэтому часто в используемых в глобальных моделях параметризациях конвекции [11–14] высота конвективного пограничного слоя выступает в качестве диагностической переменной, а вовлечение дополнительно параметризуется.

АПС представляет собой важнейший элемент системы Земли, влияющий на динамику атмосферы и ее общую циркуляцию. Поэтому разработка

более точных и вычислительно-эффективных параметризации АПС, пригодных для включения в климатические модели, чему и посвящена данная работа, является актуальной задачей.

Как уже было отмечено выше, большая физическая обоснованность и наполненность параметризаций не всегда гарантируют лучшее воспроизведение и достоверность результатов климатического моделирования, поскольку система совместного моделирования процессов в АПС и крупномасштабной динамики атмосферы порождает свой набор ограничений и желательных свойств параметризаций турбулентного переноса. Это означает, что разработка новых схем турбулентного переноса должна быть тесно связана с исследованиями по их внедрению в МЗС. В рамках работы рассматривалась как задачи разработки перспективных параметризаций АПС, так и связанные задачи — внедрения и тестирования параметризаций в МЗС. Предварительное тестирование RANS-параметризаций выполнялось при помощи локально-одномерной модели АПС, разработанной и реализованной с участием автора и содержащей иерархию турбулентных замыканий. Эта модель пригодна для решения широкого диапазона задач и применялась в работах [A1—A4]. На финальном этапе использовалась климатическая модель INMCM [15; 16], разрабатываемая в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН и участвующая в проектах по сравнению климатических моделей CMIP (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)[17].

Целью данной работы является исследование динамики стратифицированного атмосферного пограничного слоя и разработка параметризаций турбулентного обмена для крупномасштабных моделей общей циркуляции атмосферы.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. диагностики и прогноза высоты конвективного пограничного слоя с использованием интегральных моделей конвективного пограничного слоя атмосферы, их верификация по данным вихреразрешающего моделирования;
2. воспроизведения турбулентного перемешивания при устойчивой стратификации атмосферы с использованием турбулентных замыканий первого порядка на основе локального обобщения теории подобия Монина-Обухова;
3. Разработка и внедрение в модели Земной системы локально одномерной модели турбулентного перемешивания в атмосферном пограничном слое.

Научная новизна:

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

2. Выполнено исследование набора замыканий первого порядка в формализме локального обобщения ТПМО для слабо и сильно устойчиво стратифицированного пограничного слоя атмосферы.
3. В климатическую модели ИВМ РАН внедрена обновленная версия схемы турбулентного переноса в АПС.

Практическая значимость Разработанный программный комплекс, реализующий исследованные параметризации турбулентного перемешивания, внедрен в МЗС ИВМ РАН. Полученные результаты позволяют улучшить воспроизведение современного климата моделью, что позволяет ожидать также улучшения климатических и сезонных гидрометеорологических прогнозов, рассчитываемых с помощью данной модели.

Методология и методы исследования. Использовались теория и методы вычислительной геофизической гидродинамики для различных пространственных масштабов. В качестве валидационных данных использовались данные численных экспериментов с вихреразрешающей моделью АПС. Параметризации турбулентного перемешивания в АПС рассматривались в рамках осредненных по Рейнольдсу моделей. Анализ влияния параметризаций турбулентного переноса на климатическую систему проводился с использованием модели Земной системы ИВМ РАН.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Интегральная модель конвективного пограничного слоя, основанная на осредненных по высоте уравнениях притока тепла и баланса кинетической энергии турбулентности, с привлечением уточненных по данным вихреразрешающего моделирования параметров, воспроизводит высоту и коэффициент вовлечения пограничного слоя для случаев свободной конвекции и сдвигово-конвективного режима.
2. Локально-одномерные замыкания первого порядка, предполагающие линейность по параметру устойчивости безразмерного градиента скорости, в целом улучшают качество воспроизведения квазистационарных состояний устойчивых пограничных слоев. Для случаев тонких приземных слоев замыкания, предполагающие независимость безразмерных градиентов от динамической скорости в пределе сильной устойчивости, улучшают точность воспроизведения характеристик турбулентного перемешивания.
3. Калибровка параметров турбулентного замыкания первого порядка по данным расчётов вихреразрешающих моделей для устойчиво-стратифицированного пограничного слоя атмосферы позволяет улучшить результаты моделирования атмосферного пограничного слоя даже на грубых сетках модели Земной системы.
4. Новая локально-одномерная модель турбулентного перемешивания в атмосферном пограничном слое улучшает воспроизведение

метеорологического режима приземного слоя атмосферы в модели Земной системы ИВМ РАН.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием для оценки качества турбулентных замыканий открытых данных межмодельных сравнительных экспериментов и открытостью кода программ для ЭВМ, используемых в данной работе. Результаты исследования не противоречат результатам, полученными ранее другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались лично автором на конференциях: European Geoscience Union General Assembly, Вена, (2019/2021) , European Meteorological Society Annual Meeting, София/Копенгаген (2015/2018), Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде CITES, Москва, (2019/2023); Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS, Томск (2020/2024); "Турбулентность, динамика атмосферы и климата", Москва (2018/2020/2022/2024); Non-linear Wave and Processes, Нижний Новгород (2017).

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов:

- проект ФНТП 124042700008-6 в рамках программы "Совершенствование глобальной модели Земной системы мирового уровня для исследовательских целей и сценарного прогнозирования климатических изменений".
- Грантов РФ: 17-17-01210, 18-47-06-203, 20-17-00190, 24-17-00155.
- в рамках госзаданий ИФА РАН и НИВЦ МГУ: 1021032424880-5-1.5.11, 125020501524-9, 121011690004-3.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в постановке и решении всех задач диссертационной работы. Основные научные результаты диссертационной работы были опубликованы в [A1; A4; A5] . В работе [A5], автором разработана численная реализация для интегральной модели КПС предложенной С.С. Зилитинкевичем, проведен анализ применимости модели и получен набор параметров, согласованных с данным численных экспериментов вихреразрешающего моделирования. Вклад автора в работу [A1] состоял в анализе локально-одномерных моделей по данным вихреразрешающего моделирования, реализации замыканий первого порядка в рамках локально-обобщенной теории подобия Монина-Обухова в локально-одномерной модели, которая также входит в РИД [A7]. В работе [A4] вклад автора относится к выделению одноколоночной версии модели пограничного слоя из МСЗ ИВМ РАН, которая также зарегистрирована как отдельный РИД [A8], внедрение новых параметризаций турбулентного перемешивания, расчеты и анализ экспериментов с климатической моделью.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 6 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 8 — в тезисах докладов. Зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Работа состоит из 4 глав, заключения и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 100 страниц, включая 20 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 99 наименований.

Содержание работы

Во **введении** 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.

Первая глава посвящена описанию параметризаций турбулентного перемешивания в АПС и обзору способов их тестирования и валидации с помощью данных численных экспериментов с вихреразрешающими моделями.

В разделе 1.1 приводится общее описание формулировки параметризаций турбулентного переноса и одноколоночной системы уравнений АПС, которая далее в работе используется для проведения численных расчетов. В разделе 1.2 описывается используемая в МЗС ИВМ РАН параметризация и особенности ее реализации.

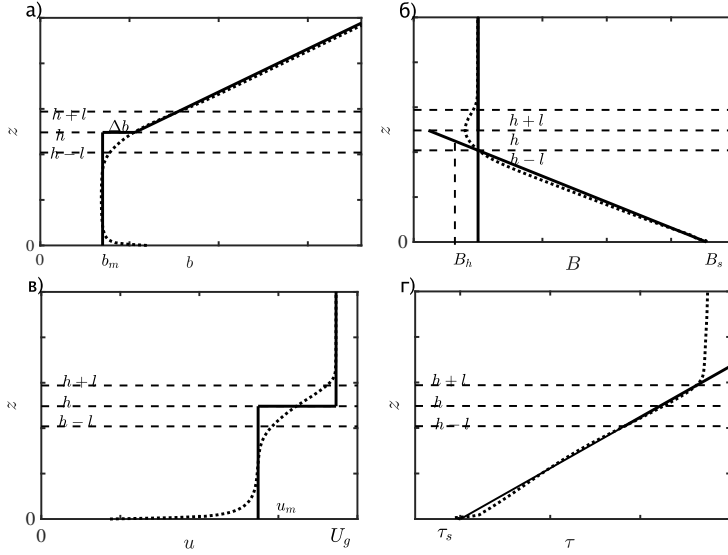


Рисунок 1 — Профили плавучести (а), потока плавучести (б), горизонтальной скорости ветра (в) и вертикального потока импульса (г) в конвективном пограничном слое (КПС), развивающегося на фоне устойчиво стратифицированной свободной атмосферы, при наличии фонового ветра. Сплошной черной линией представлены схематические профили, используемые в интегральных моделях КПС, пунктирной линией – осредненные по времени профили по данным LES-расчетов.

В разделе 1.3 приводится описание методов вихреразрешающего моделирования и детали используемых в данной работе LES моделей, разрабатываемых в НИВЦ МГУ и ИВМ РАН.

Вторая глава посвящена исследованию аналитических интегральных моделей КПС. В разделе 2.1 приводится формулировка интегральных моделей "нулевого" порядка и их вывод. На Рисунке 1 схематически представлены профили плавучести и горизонтальной скорости и турбулентных потоков в моделях "нулевого" порядка и их соответствие получаемым в LES модели профилям.

Основу интегральных моделей КПС составляет интегрированное по высоте КПС уравнение притока тепла в приближении горизонтальной однородности:

$$\frac{1}{2} \frac{d(N^2 h^2)}{dt} = B_s - B_h = (1 + A) B_s, \quad (1)$$

где t – время, h – высота КПС, $B_s = B(z = 0)$ – приземный поток плавучести (принятый для простоты постоянным по времени), B_h – поток плавучести на границе КПС, N – частота Вайсяля-Брента над пограничным слоем. Для получения эволюционного уравнения для коэффициента вовлечения $A = -B_h/B_s$, используется интегральное уравнение баланса кинетической энергии турбулентности:

$$\int_0^h \frac{\partial E_k}{\partial t} dz = \int_0^h B dz - \int_0^h \boldsymbol{\tau} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} dz - \int_0^h \frac{\partial F}{\partial z} dz - \int_0^h \epsilon dz. \quad (2)$$

Здесь E_k – кинетическая энергия турбулентности, ϵ – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности (КЭТ), $F = \overline{u'_i u'_i w'} + \frac{1}{\rho} \overline{p' w'}$ – вертикальный турбулентный поток КЭТ, $\boldsymbol{\tau} = (\overline{u' w'}, \overline{v' w'}, \overline{w' w'})$ – вертикальный поток импульса, $\mathbf{u} = (u, v, w)$ – вектор скорости ветра. При свободной конвекции, средняя генерация КЭТ за счет сдвига скорости ветра равна нулю. В этом случае, подинтегральные выражения можно вычислить, используя теорию самоподобия Дирдорфа [18]:

$$E_k = W_*^2 \Phi_{EK}(z/h), \quad \epsilon = (W_*^3/h) \Phi_{DK}(z/h), \quad (3)$$

где $W_* = (B_s h)^{1/3}$ – конвективный масштаб скорости Дирдорфа, характеризующий типичное значение вертикальной и горизонтальной скорости в самоорганизующихся термиках КПС, Φ_i , ($i = EK, DK$) – безразмерные функции. Однако, для сдвигово-конвективного случая масштабирование КЭТ и скорости диссипации может быть представлено различными способами: $W_e^3 = W_*^3 + \eta^3 u_*^3$, где $u_* = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho}}$ – масштаб динамической скорости (определяемый по турбулентному потоку импульса у поверхности τ_s), η – константа, и с помощью предложенного в [19] разделения характерной скорости на конвективную и сдвиговую составляющую $E_k = W_*^2 \Phi_{EK}(\eta) + V_*^2 \Phi_{SK}(\eta)$, где $V_* = (2u_*^2 U_m)^{1/3}$ – сдвиговый масштаб скорости, U_m – модуль средней скорости внутри КПС.

На рис. 2 представлена эволюция интеграла КЭТ внутри КПС, нормированного на различные предложенные масштабы. Нормировка с помощью обобщенного масштаба делает безразмерную среднюю КЭТ в КПС почти постоянной.

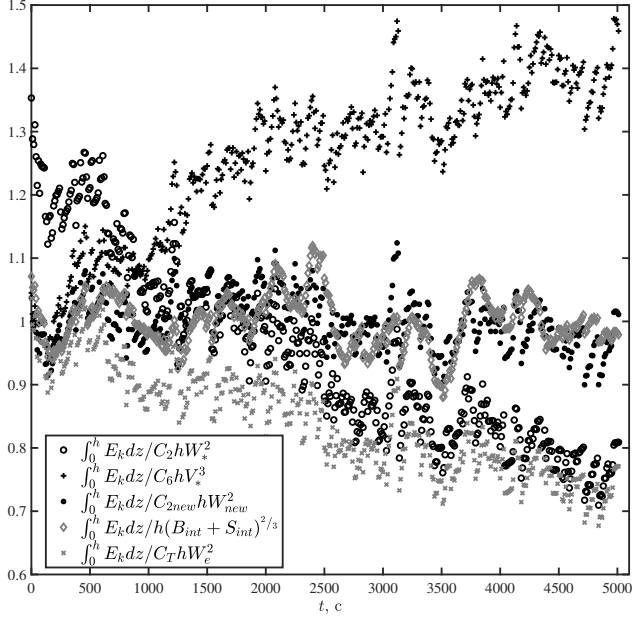


Рисунок 2 — Временной ход обезразмеренного интеграла КЭТ, в зависимости от выбора интегральных масштабов для нормировки, по данным численных экспериментов с вихреразрешающей моделью.

Член турбулентного переноса КЭТ в уравнении (2) – дивергентный, и, соответственно, преобразуется в поток КЭТ из слоя вовлечения за счет уходящих вверх гравитационных волн. При этом, в качестве масштаба длины волны для случая свободной конвекции принимается толщина слоя вовлечения $\Lambda \sim \frac{A}{1+A}h$, а для сдвигово-конвективного режима – высота КПС, $\Lambda \sim h$.

Тогда проинтегрированное уравнение баланса КЭТ (2) приводится к эволюционному уравнению для коэффициента вовлечения:

$$C_{TZ}W_*^{-1}\frac{dh}{dt} + C_6W_*^{-3}\frac{d(V_*^2h)}{dt} = C_1 - A - C_4\frac{N^3}{B_s^{3/2}}\left(\frac{A}{1+A}\right)^2 + C_5\left(\frac{V_*}{W_*}\right)^3, \quad (4)$$

а временная эволюция высоты КПС вычисляется с помощью уравнения (1). Константы C_i , $i = 1, \dots, 5$ в ур.(4) определяются по данным LES экспериментов, описанию которых посвящен *раздел 2.2*. Для оценки применимости различных аппроксимаций членов интегрального баланса КЭТ и других

предположений, приводящих к системе уравнений интегральной модели КПС, описанной выше, 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 гравитационными волнами), скорость ветра и шероховатость.

В разделе 2.3, обсуждаются результаты численных экспериментов, а также тестирования полученной интегральной модели КПС. Данные расчетов подтверждают, что профили КЭТ и диссипации КЭТ хорошо масштабируются с помощью высоты КПС и масштаба Дирдорфа, соответствующие безразмерные константы оказались близкими к предыдущим оценкам из лабораторных экспериментов. Анализ экспериментов со сдвиговой конвекцией показал, что в этом случае масштабирование интеграла КЭТ и интеграла диссипации по высоте КПС с помощью линейной комбинации W_* и V_* является оправданным предположением и позволяет строить интегральные модели КПС в приближении нулевого скачка температуры и скорости на верхней границе. Также показано, что поток КЭТ, выносимый из слоя вовлечения гравитационными волнами, мал, но им нельзя пренебречь в интегральном уравнении для КЭТ. В разделе 2.4 обобщаются основные результаты данной главы.

Третья глава посвящена исследованию эффективных замыканий первого порядка для устойчивой стратификации. В разделе 3.1 приводится обзор основных проблем воспроизведения устойчивого АПС локально-одномерными моделями, формулируется исследуемый класс замыканий первого порядка, а также их связь с локально-обобщенной ТПМО. Так, при некоторых ограничениях на масштаб длины, безразмерные градиенты скорости и температуры:

$$\phi_m(\zeta) = \frac{\partial |\mathbf{U}|}{\partial z} / \left(\frac{\sqrt{\tau}}{\kappa z} \right), \quad (5)$$

$$\phi_h(\zeta) = \frac{\partial \Theta}{\partial z} / \left(\frac{\Theta_*}{\kappa z} \right), \quad (6)$$

связаны с функциями устойчивости f_m и f_h :

$$f_m = \phi_m^{-2}(\zeta), \quad (7)$$

$$f_h = \frac{1}{\phi_m(\zeta)\phi_h(\zeta)}. \quad (8)$$

В таком случае, их можно рассматривать как "поверхностные" функции устойчивости, используемые для расчета приземных турбулентных потоков при известных значениях средних метеорологических переменных на некоторой заданной высоте, так и как безразмерные градиенты, определяющиеся замыканием первого порядка.

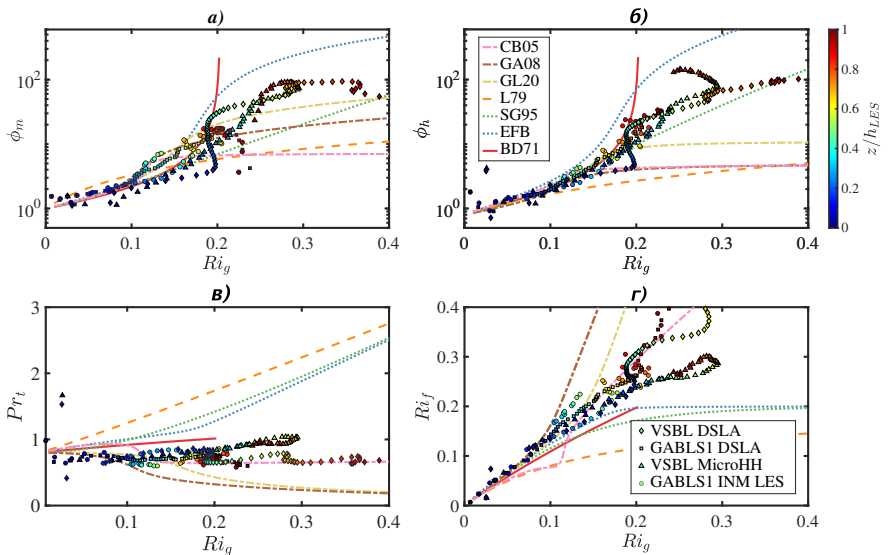


Рисунок 3 — (a) ϕ_m , (b) ϕ_h , (c) Pr_t , (d) Ri_f как функции Ri_g . Легенда соответствует таблице 1. Кружками, треугольниками, ромбами и квадратами представлены данные LES экспериментов, цветовая палитра соответствует безразмерной высоте z/h на которой они рассчитывались.

Значительный набор универсальных функций (УФ), предложенных в литературе, можно разделить на несколько групп исходя из их функциональной формы и асимптотик. Их описание представлено в подразделах 3.11-3.1.4. Основными категориями различия при этом является функциональная форма безразмерного градиента скорости и поведение турбулентного числа Прандтля Pr_t в пределе сильной устойчивости. Так, УФ можно разделить на использующие линейную зависимость безразмерного градиента скорости от параметра устойчивости z/L , что хорошо согласуется с данными прямого численного и вихреразрешающего моделирования, и использующие нелинейный безразмерный градиент скорости, обычно полученные по данным натурных измерений и согласованных с ” u_* -less” асимптотикой (соответствующей отсутствию зависимости градиента скорости от потока импульса при сильной устойчивости).

В таблице 1 приведен краткий список исследуемых функций устойчивости, а на рис. 3 показана их зависимость от градиентного числа Ричардсона Ri_g . Наиболее близкое соответствие с агрегированными данными LES для безразмерных градиентов наблюдается в области $0.1 < Ri_g < 0.17$ у функций Бузингера-Дайера, за которыми следуют замыкания EFB

и GL20. Замыкания, основанные на эмпирических данных и согласованные с нелинейным безразмерным градиентом скорости существенно отличаются. Их решения не имеют критического числа Ричардсона, а турбулентное число Прандтля в данном случае не растет с ростом устойчивости, а уменьшается. Замыкание Луиса (используемое в МЗС ИВМ РАН) существенно недооценивает критическое потоковое число Ричардсона, а линейный рост турбулентного числа Прандтля начинается гораздо раньше, чем по данным LES.

Таблица 1 — Сравнимые турбулентные замыкания

УФ	$\phi_m(\zeta)$	$\phi_h(\zeta \rightarrow \infty)$	Источник
BD71	линейный	$Pr_t \rightarrow C > 0$	[1; 2]
EFB	линейный	$Pr_t \sim Ri_g$	[20]
SG95	линейный	$Pr_t \sim Ri_g$	[21]
GA08	нелинейный	Eq. $Pr_t \rightarrow 0$	[22; 23]
GL20	нелинейный	Eq. $Pr_t \rightarrow 0$	[24]
CB05	нелинейный	$Pr_t \rightarrow C > 0$	[25]
L79	нелинейный	$Pr_t - > C > 0$	[6; 7]

В разделе 3.2 представлено сравнение одноколоночных моделей, использующих полученные замыкания, с данными LES экспериментов для условий слабой и сильной устойчивости. Для численных постановок использовались конфигурации GABSL1 [26] и VSBL [27] соответственно. Результаты сравнения (см. рисунок 3) сравнения одноколоночных моделей показали, что наилучшее согласие с данными LES было получено при использовании BD71 и EFB замыканий, за которыми следует схема SG95. Все остальные замыкания приводят к слишком сильному перемешиванию и, следовательно, завышают высоту АПС. Степень завышения варьируется от схемы к схеме, и в зависимости от целевой метеовеличины не всегда одно и то же замыкание оказывается лучше. Однако наибольшие расхождения с LES демонстрирует схема [6]. Эти результаты более выражены для эксперимента VSBL, чем для слабоустойчивых условий. Стоит отметить, что данное сравнение подразумевает наиболее "благоприятные" условия для одноколоночных моделей, так как разрешение по времени и пространству было значительно выше, чем фактически используемое в моделях прогноза погоды и климата.

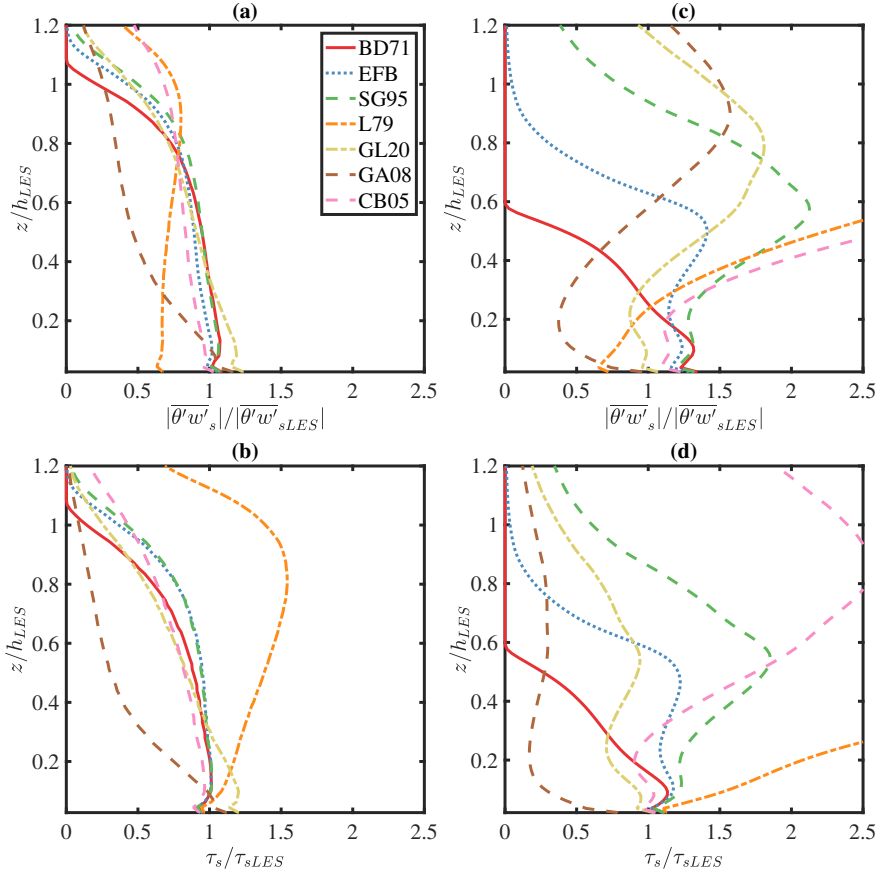


Рисунок 4 — Профили относительной ошибки приповерхностных потока тепла (a, b) импульса (c, d), полученные по расчетам соответствующих интегральных функций устойчивости относительно поверхностного потока, рассчитанного по данным LES в экспериментах GABLS1 (слева) и VSBL (справа). Легенда соответствует таблице 1.

Обобщение локальных функций безразмерных градиентов на весь пограничный слой может дать существенные ошибки в одномерных моделях, если эти функции неявно содержат информацию о зависимости потоков от безразмерной высоты z/h . Однако это же обстоятельство может дать преимущество при использовании этих интегральных функций для расчета поверхностных потоков в предположении нарушения условия постоянства потоков с высотой. Это подразумевает, что первый вертикальный уровень

модели находиться на $z/h > 0.1$. В подразделе 3.2.3 рассмотрена применимость вышеупомянутых наборов УФ как интегральных формул для разных значений z/h , при этом значения средних температуры и скорости ветра брались рассчитанными из LES модели, исключая, таким образом, ошибку в воспроизведении профилей из сравнения. На рис. 4 представлена ошибка относительно потоков на поверхности, получаемых в LES модели для случаев слабой и сильной устойчивости. Для слабо стратифицированных АПС большинство поверхностных схем показывают хорошие результаты до 0.8 высоты ПС, за исключением функций Луиса. Для очень устойчивых АПС, поверхностные схемы, основанные на линейных безразмерных градиентах скорости, будут давать стремящиеся к нулю потоки при интегрировании начиная с половины ПС, а функции с нелинейным градиентом скорости, основанные на эмпирических данных, только при достижении $z/h \sim 1$. В свою очередь, такое поведение может быть желательной характеристикой для реализации в моделях климата и прогноза погоды, чтобы предотвратить декаплинг АПС от подстилающей поверхности на грубых вертикальных сетках. С другой стороны, функции с длинными хвостами, такие как СВ05 и L79, сильно переоценивают поверхностные потоки. В разделе 3.3 обобщаются основные результаты третьей главы.

Четвертая глава посвящена внедрению новых замыканий первого порядка в МЗС ИВМ РАН и исследованию их влияния на воспроизведение моделью современного климата. В разделе 4.1 обосновывается выбор внедряемых замыканий первого порядка. В разделе 4.2 обсуждаются особенности реализации модели пограничного слоя в МЗС ИВМ РАН. Как уже было сказано выше, замыкания первого порядка с "короткими" хвостами могут приводить к декаплингу АПС с поверхностью при сильном выхолаживании поверхности (это наблюдалось и в предварительных тестах с климатической моделью). Поэтому для внедрения рассматривались новые функции устойчивости ЕВ, основанные на данных LES [28], которые не приводят к чрезмерному перемешиванию и следуют правильному асимптотическому поведению, получаемому в теории и численных экспериментах LES для при очень устойчивой стратификации. Раздел 4.3 посвящен описанию данного замыкания. Насколько известно автору, результаты применения этих функций ранее не оценивалось ни в одной глобальной модели. Для внедрения в МЗС с учетом необходимости снижения вычислительной сложности при проведении длительных климатических расчетов рассматривались только замыкания первого порядка.

Поскольку функции ЕВ получены на основе набора различных LES экспериментов по воспроизведению устойчивого АПС, в подразделах 4.3.1 представлена оптимизация констант на расширенном наборе LES-данных для улучшения результатов моделирования. Для это были дополнительно проведены 10 численных экспериментов с похожей на GABLS1 постановкой, но покрывающих интервал интегральной устойчивости $h/L = [1.5, 7]$.

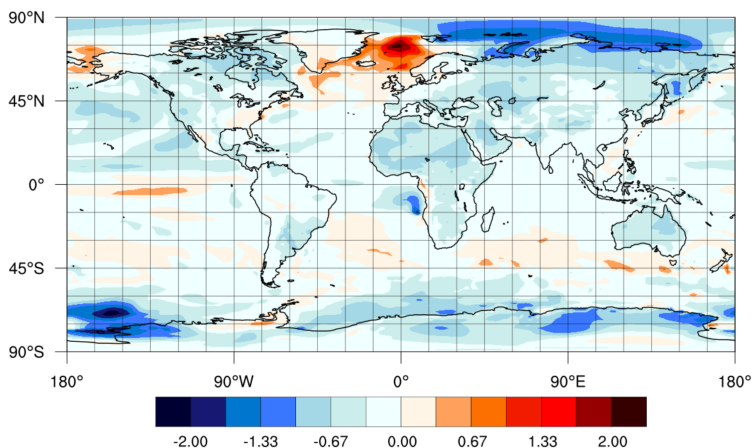


Рисунок 5 — Среднегодовое поле разницы приземной температуры между экспериментами МЗС ИВМ РАН с модифицированной параметризацией турбулентного переноса и оригинальной версией МЗС ИВМ РАН за период 1979-2004гг.

Для оптимизации использовался метод роя частиц [29], где каждая “частица” представляет собой реализацию одноколоночной модели с грубой вертикальной сеткой с замыканием ЕВ с определенными константами для вышеупомянутых конфигураций численных экспериментов. В качестве оптимизационной функции использовалась квадратичная ошибка профилей скорости ветра, температуры и турбулентных потоков относительно вихреразрешающей модели. Оптимизация показала хорошую сходимость и приблизило поведение замыкания к асимптотике $Pr_t \sim Ri_{f\infty}^{-1} Ri_g$, где $Ri_{f\infty}^{-1}$ – критическое потоковое число Ричардсона, которое по данным прямого численного моделирования можно оценить как $Ri_{f\infty}^{-1} \approx 0.2$.

В подразделе 4.3.2 описываются постановки численных экспериментов по воспроизведению современного климата моделью Земной системы ИВМ РАН. Раздел 4.4 посвящен сравнению старой и новой версии климатической модели и анализу влияния внедрения нового замыкания. Улучшение воспроизведения климата оценивалось относительно интерполированных на сетку модели данных реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) пятого поколения (ERA5)[30].

На рис. 5 и 6 представлены различия в среднегодовых полях приземной температуры версий модели со старым и новым замыканием, а также пространственное распределение ошибок относительно реанализа. Как видно, ЕВ замыкание ожидаемо улучшает воспроизведение приземной температуры, в основном, в полярных регионах, где наблюдаются наиболее устойчивые ПС. Похожее улучшение наблюдается и в других приземных полях: давления на уровне моря, скорости ветра на 10м; уменьшается

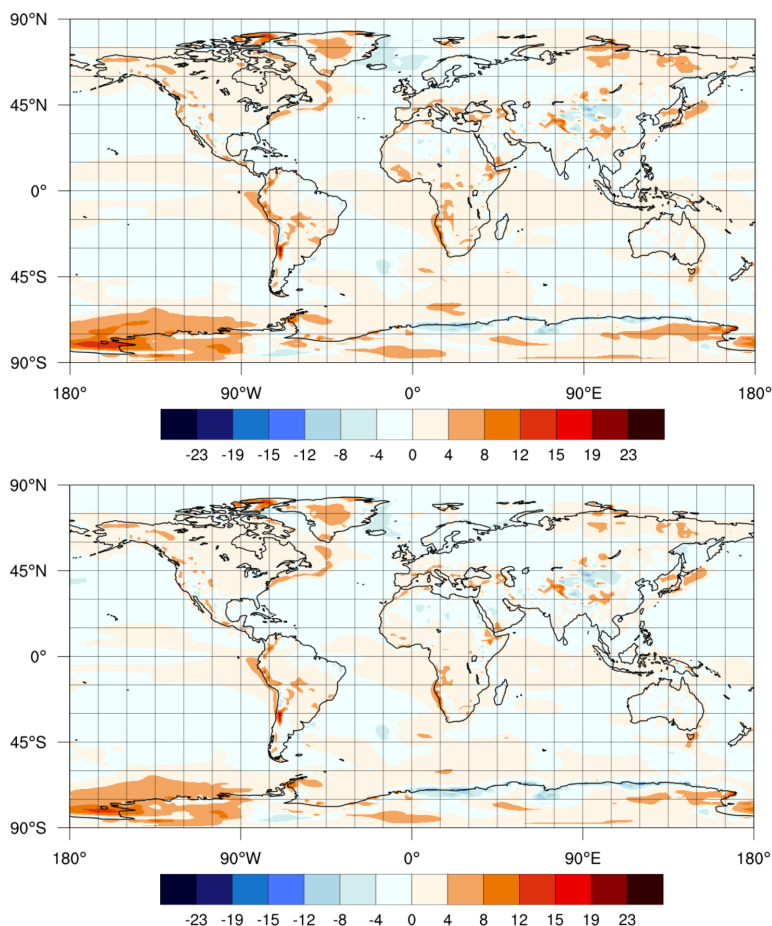


Рисунок 6 — Средняя ошибка относительно ERA5 для INMCM (слева) и INMCM+EB (справа) в поле приземной температуры.

ошибка в средней высоте пограничного слоя. При этом не происходит ухудшения в тесно связанных с воспроизведением динамики АПС полях облачности и осадков. Кроме того, похолодание прибрежной части Антарктики приводит к увеличению приземного градиента ветра в Южном океане и усилению антарктического антициклона. Однако, эксперименты с дополнительно оптимизированными параметрами замыкания, не показывают значимого улучшения относительно версии модели с оригинальными константами. В разделе 4.5 подводятся итоги 4-ой главы.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Выполнена модификация интегральной модели КПС для случая свободной конвекции и сдвигово-конвективного режима. На основе

данных LES экспериментов высокого разрешения оценены параметры интегральной модели в том числе для генерации ТКЭ за счёт сдвига скорости в пограничном слое, при этом был использован масштаб скорости, учитывающий как приповерхностную скорость трения, так и среднюю скорость ветра в КПС.

2. Показано, что для квазистационарных слабо- и сильно-устойчивых ПС турбулентные замыкания первого порядка с использованием локально-обобщенной ТПМО могут воспроизводить стационарное состояние, получающееся в LES экспериментах. При этом лучше его воспроизводят замыкания, использующие линейный безразмерный градиент скорости и растущее с устойчивостью турбулентное число Прандтля. На грубых сетках данные замыкания значительно занижают турбулентные потоки в приземном слое при сильной устойчивости, а замыкания основанные на " u_* -less" асимптотике, позволяют сохранить обмен с поверхностью и избежать явления декаплинга.
3. Реализована новая схема вертикального турбулентного перемешивания в МЗС ИВМ РАН INMCM. Модифицированные функции устойчивости лучше воспроизводят УПС на сетке модели в идеализированных экспериментах. Для новой версии замыкания проведена оптимизация констант функций устойчивости по данным набора LES экспериментов для устойчиво-стратифицированного ПС.
4. Использование новой схемы турбулентного переноса в расчетах по воспроизведению современного климата позволяет уменьшить ошибку модели относительно реанализа в приземных характеристиках.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК РФ (WoS/Scopus)

- A1. *Debolskiy A. V., Mortikov E. V., Glazunov A. V., Lüpkes C.* Evaluation of surface layer stability functions and their extension to first order turbulent closures for weakly and strongly stratified stable boundary layer // *Boundary-Layer Meteorology*. — 2023. — Vol. 187, no. 1. — P. 73—93. — DOI: 10.1007/s10546-023-00784-3.
- A2. *Glazunov A., Mortikov E., Debolskiy A.* Studies of stable stratification effect on dynamic and thermal roughness lengths of urban-type canopy using large-eddy simulation // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — United States, 2022. — DOI: 10.1175/jas-d-22-0044.1.

- A3. *Glazunov A. V., Debolskiy A. V., Mortikov E. V.* Turbulent Length Scale for Multilayer RANS Model of Urban Canopy and Its Evaluation Based on Large-Eddy Simulations // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. — 2021. — Vol. 8, no. 4. — P. 100—116. — DOI: 10.14529/jsfi210409.
- A4. *Mortikov E. V., Debolskiy A. V., Glazunov A. V., Chechin D. G., Sheshtakova A. A., Suiazova V. I., Gladskikh D. S.* Planetary boundary layer scheme in the INMCM Earth system model // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. — Netherlands, 2024. — Vol. 39, no. 6. — P. 343—352. — DOI: 10.1515/rnam-2024-0029.
- A5. *Дебольский А. В., Степаненко В. М., Глазунов А. В., Зилитинкевич С. С.* Интегральные модели проникающей конвекции со сдвигом скорости // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. — 2019. — Т. 55, № 2. — С. 3—16. — DOI: 10.31857/S0002-35155523-16.
- A6. *Варенцов М. И., Репина И. А., Глазунов А. В., Самсонов Т. Е., Константинов П. И., Степаненко В. М., Лыкосов В. Н., Артамонов А. Ю., Дебольский А. В., Печкин А. С., Соромотин А. В.* Особенности пограничного слоя атмосферы г. Надыма по данным экспериментальных измерений и вихреразрешающего моделирования // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. — 2022. — № 6. — С. 64—78. — DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-64-78.

Зарегистрированные программы для ЭВМ

- A7. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Система моделирования горизонтально однородных геофизических пограничных слоев с реализацией иерархии турбулентных замыканий / Е. В. Мортиков, А. В. Дебольский, Д. С. Гладских, Р. А. Ахтамьянов, Е. М. Гашук, А. А. Шестакова, В. И. Суязова ; НИВЦ МГУ. — № 990-2024 ; заявл. 31.12.2024 ; опубли. 31.12.2024, 990-2024 (Рос. Федерация).
- A8. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Блок параметризаций пограничного слоя атмосферы для моделей Земной системы / Е. В. Мортиков, Е. М. Ахтамьянов Р. А. Гашук, М. А. Тарасова, А. В. Дебольский, А. И. Варенцов, А. А. Шестакова, Д. Г. Чечин, Е. М. Володин, Н. И. Силин ; НИВЦ МГУ. — № 2024690745 ; заявл. 31.12.2024 ; опубли. 31.12.2024, 2024690745 (Рос. Федерация).

В сборниках трудов конференций

- A9. Дебольский А. В., Мортиков Е. В., Глазунов А. В., Володин Е. М., Тарасова М. А. Оптимизация параметризаций турбулентного перемешивания в модели INMCM6 // Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2023. — 2023. — С. 66—66.
- A10. Дебольский А. В., Мортиков Е. В., Глазунов А. В., Володин Е. М. Улучшения в параметризации турбулентного перемешивания в модели INMCM5 // Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2022. — ИМКЭС СО РАН Томск, 2022. — С. 122—125.
- A11. Дебольский А. В., Мортиков Е. В., Коленникова М. А., Володин Е. М. Улучшение параметризации устойчивого пограничного слоя атмосферы в модели INMCM5 // Всероссийская конференция, посвященная памяти академика А.М.Обухова "Турбулентность, динамика атмосферы и климата". — Физматкнига Москва, 2022. — С. 157—157.
- A12. *Debolskiy A., Mortikov E., Glazunov A., Lüpkes C.* Evaluating turbulent length scales from local MOST extension with different stability functions in first order closures for stably stratified boundary layer // European Geosciences Union General Assembly 2021. — Germany : Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union, 2021. — DOI: 10.5194/egusphere-egu21-14957.
- A13. Дебольский А. В., Мортиков Е. В., Глазунов А. В., Лысков В. Н. Исследование параметризаций вертикальной турбулентной диффузии, использующихся в моделях общей циркуляции атмосферы и океана // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова. 10–12 ноября 2020 года. Сборник тезисов докладов. — Физматкнига Москва, 2020. — С. 14—14.
- A14. *Debolskiy A., Mortikov E., Glazunov A.* A comprehensive suite for evaluation of single column turbulent closures // European Geosciences Union General Assembly 2018. Vol. 21. — Germany : Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union, 2019. — (Geophysical Research Abstracts).
- A15. *Debolskiy A., Mortikov E., Glazunov A., Kadantsev E., Zilitinkevich S.* Evaluating single column parametrizations of turbulent vertical diffusion for use in GCMs // EMS Annual Meeting Abstracts. Vol. 16. — 2019.

- A16. *Repina I., Artamonov A., Debolskiy A., Pashkin A.* Parameterization of turbulent exchange in the polar regions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 606. — IOP Publishing. 2020. — P. 012049.

Список литературы

1. *Businger J. A., Wyngaard J. C., Izumi Y., Bradley E. F.* Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer // Journal of Atmospheric Sciences. — 1971. — Т. 28, № 2. — С. 181–189.
2. *Dyer A.* A review of flux-profile relationships // Boundary-Layer Meteorology. — 1974. — Т. 7, № 3. — С. 363–372.
3. *Kadantsev E., Mortikov E., Zilitinkevich S.* The resistance law for stably stratified atmospheric planetary boundary layers // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. — 2021. — Т. 147, № 737. — С. 2233–2243.
4. *Derbyshire S.* Boundary-layer decoupling over cold surfaces as a physical boundary-instability // Bound.-Layer Meteorol. — 1999. — Т. 90. — С. 297–325.
5. *Holtslag A., Svensson G., Basu S., Beare B., Bosveld F., Cuxart J.* Overview of the GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study (GABLS) // Proceedings of the Workshop on Diurnal cycles and the stable boundary layer, 7-10 November 2011, Reading, UK. — 2012. — С. 11–23.
6. *Louis J.-F.* A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere // Boundary-Layer Meteorology. — 1979. — Т. 17, № 2. — С. 187–202.
7. *Louis J., Tiedtke M., Geleyn J.* A short history of the operational PBL-Parameterization of ECMWF, Workshop on planetary boundary layer parameterization. — 1982.
8. *Edwards J. M., Beljaars A. C., Holtslag A. A.* [и др.]. Representation of boundary-layer processes in numerical weather prediction and climate models // Bound.-Layer Meteorol. — 2020. — Т. 177, № 2/3. — С. 511–539.
9. *Garratt J., Wilczak J., Holtslag A., Schmid H. P., Grachev A., Beljaars A., Foken T., Chen F., Fairall C., Hicks B.* [и др.]. Commentaries on Top-Cited Boundary-Layer Meteorology Articles // Boundary-Layer Meteorology. — 2020. — Т. 177, № 2. — С. 169–188.

10. Суязова В. И., Дебольский А. В., Мортиков Е. В., Гладских Д. С., Шестакова А. А., Чечин Д. Г. Влияние параметризаций термической шероховатости на расчет турбулентных потоков моделью приземного слоя атмосферы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2025.
11. Kohler M., Ahlgrimm M., Beljaars A. Unified treatment of dry convective and stratocumulus-topped boundary layers in the ECMWF model // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. — 2011. — Т. 137, № 654. — С. 43–57. — DOI: 10.1002/qj.713.
12. Witek M. L., Teixeira J., Matheou G. An Integrated TKE-Based Eddy Diffusivity/Mass Flux Boundary Layer Closure for the Dry Convective Boundary Layer // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2010. — Т. 68. — С. 1526–1540. — DOI: 10.1175/2011JAS3548.1. — URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2011JAS3548.1>.
13. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes // Monthly Weather Review. — 2006. — Т. 134. — С. 2318–2341. — URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/MWR3199.1>.
14. Volodin E. Simulation of present-day climate with the INMCM60 model // Izv., Atmos. Oceanic. Phys. — 2023. — Т. 59, № 1. — С. 16–22.
15. Volodin E., Mortikov E., Kostykin S., Galin V. Y., Lykossov V., Gritsun A., Diansky N., Gusev A., Iakovlev N. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // Climate dynamics. — 2017. — Т. 49, № 11. — С. 3715–3734.
16. Volodin E., Gritsun A. Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INM-CM5 // Earth System Dynamics. — 2018. — Т. 9, № 4. — С. 1235–1242.
17. Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., Taylor K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geoscientific Model Development. — 2016. — Т. 9, № 5. — С. 1937–1958.
18. Deardorff J. W. Parameterization of the planetary boundary layer for use in general circulation models // Monthly Weather Review. — 1972. — Т. 100, № 2. — С. 93–106. — DOI: 10.1175/1520-0493(1972)100<0093:POTPBL>2.3.CO;2.
19. Zilitinkevich S. S. The Height of the Atmospheric Planetary Boundary layer: State of the Art and New Development // National Security and Human Health Implications of Climate Change / под ред. H. J. S. Fernando, Z. Klaić, J. L. McCulley. — Dordrecht : Springer Netherlands, 2012. — С. 147–161.

20. *Zilitinkevich S., Elperin T., Kleeorin N., Rogachevskii I., Esau I.* A hierarchy of energy-and flux-budget (EFB) turbulence closure models for stably-stratified geophysical flows // *Boundary-layer meteorology*. — 2013. — T. 146, № 3. — C. 341–373.
21. *Schumann U., Gerz T.* Turbulent mixing in stably stratified shear flows // *Journal of applied meteorology*. — 1995. — T. 34, № 1. — C. 33–48.
22. *Grachev A. A., Andreas E. L., Fairall C. W., Guest P. S., Persson P. O. G.* SHEBA flux–profile relationships in the stable atmospheric boundary layer // *Boundary-layer meteorology*. — 2007. — T. 124, № 3. — C. 315–333.
23. *Grachev A. A., Andreas E. L., Fairall C. W., Guest P. S., Persson P. O. G.* Turbulent measurements in the stable atmospheric boundary layer during SHEBA: ten years after // *Acta Geophysica*. — 2008. — T. 56, № 1. — C. 142–166.
24. *Gryanik V. M., Lüpkes C., Grachev A.* [и др.]. New modified and extended stability functions for the stable boundary layer based on SHEBA and parametrizations of bulk transfer coefficients for climate models // *J. Atmos. Sci.* — 2020. — T. 77, № 8. — C. 2687–2716.
25. *Cheng Y., Brutsaert W.* Flux-profile relationships for wind speed and temperature in the stable atmospheric boundary layer // *Boundary-Layer Meteorology*. — 2005. — T. 114, № 3. — C. 519–538.
26. *Cuxart J., Holtslag A. A., Beare R. J., Bazile E., Beljaars A., Cheng A., Conangla L., Ek M., Freedman F., Hamdi R.* [и др.]. Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer // *Boundary-Layer Meteorology*. — 2006. — T. 118, № 2. — C. 273–303.
27. *Linden S. J. van der, Edwards J. M., Heerwaarden C. C. van, Vignon E., Genthon C., Petenko I., Baas P., Jonker H. J., Wiel B. J. van de.* Large-Eddy Simulations of the Steady Wintertime Antarctic Boundary Layer // *Boundary-Layer Meteorology*. — 2019. — T. 173, № 2. — C. 165–192.
28. *Esau I. N., Byrkjedal Ø.* Application of a large-eddy simulation database to optimisation of first-order closures for neutral and stably stratified boundary layers // *Bound.-Layer Meteorol.* — 2007. — T. 125. — C. 207–225.
29. *Bonyadi M. R., Michalewicz Z.* Particle swarm optimization for single objective continuous space problems: a review // *Evolutionary computation*. — 2017. — T. 25, № 1. — C. 1–54.

30. *Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M., Balsamo G., Bauer d. P.* [и др.]. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the royal meteorological society. — 2011. — Т. 137, № 656. — С. 553—597.

Дебольский Андрей Владимирович

Турбулентный обмен в пограничном слое атмосферы: параметризации на
основе вихреразрешающих и осредненных по Рейнольдсу моделей

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____