

Отзыв научного руководителя

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

Дебольский Андрей Владимирович в 2015 году окончил магистерскую программу на кафедре метеорологии и климатологии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. По окончании Университета в том же году Дебольский А.В. поступил в очную аспирантуру Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

Задачей, поставленной Андрею Владимировичу, было исследование турбулентного перемешивания в атмосферном пограничном слое при различных условиях стратификации с целью разработки параметризаций для моделей Земной системы.

Атмосферный пограничный слой — это нижний, непосредственно контактирующий с поверхностью планеты слой атмосферы, в котором происходят ключевые процессы обмена импульсом, теплом, влагой и парниковыми газами между подстилающей поверхностью и свободной атмосферой. Именно турбулентность выступает главным двигателем этого обмена, а ее интенсивность кардинально меняется в зависимости от стратификации — то есть устойчивости атмосферы, которая может быть нейтральной, конвективной (неустойчивой) или стабильной (устойчивой). Понимание физики турбулентного перемешивания в каждом из этих режимов необходимо прежде всего для разработки точных и физически обоснованных параметризаций для моделей Земной системы. Без корректного описания мелкомасштабных процессов турбулентного перемешивания, которые сами модели разрешить не в состоянии из-за вычислительных ограничений, невозможно достоверно спрогнозировать ни формирование облаков, ни эволюцию погодных систем, ни концентрацию аэрозолей, ни перенос малых газовых примесей. Например, в устойчивом слое (ночью или зимой) турбулентное перемешивание подавлено, что может приводить к резкому застою загрязняющих веществ и образованию смога, в то время как в неустойчивом (днем) активная конвекция эффективно рассеивает примеси, но также и способствует развитию мощной кучевой облачности, влияющей на радиационный баланс.

Для разработки параметризаций используются турбулентные замыкания — математические методы, позволяющие замкнуть систему уравнений Навье-Стокса для описания турбулентности, когда прямое моделирование турбулентности невозможно из-за вычислительных ограничений.

В случае конвективного пограничного слоя значимую роль играет оценка высоты КПС. Поэтому на первом этапе работы с использованием вихреразрешающего моделирования Дебольским А.В. были верифицированы интегральные модели конвективного пограничного слоя атмосферы для диагностики и прогноза высоты КПС. Им был полностью освоен аппарат вихреразрешающего моделирования, который явился основой работы над диссертацией.

Наибольшие трудности с воспроизведением динамики АПС возникают в условиях устойчивой стратификации атмосферы. Следующим этапом стали теоретические исследования воспроизведения турбулентного перемешивания при устойчивой стратификации с использованием турбулентных замыканий первого порядка на основе локального обобщения теории подобия Мони́на-Обухова. На основе экспериментов с использованием вихре-разрешающего моделирования Дебольским А.В. было проанализировано 8 различных замыканий и показано, что замыкания 1-го порядка могут воспроизводить стационарное состояние в устойчивом АПС. При этом лучше его

воспроизводят замыкания, использующие линейный безразмерный градиент скорости и растущее с устойчивостью турбулентное число Прандтля.

Учитывая тот факт, что разработка новых схем турбулентного переноса должна быть тесно связана с исследованиями по их внедрению в модели Земной системы, заключительным этапом работы стали разработка и внедрение в климатическую модель ИВМ РАН локально одномерной модели турбулентного перемешивания в атмосферном пограничном слое. Использовались новые функции устойчивости, основанные на данных вихре-разрешающего моделирования. В результате удалось достичь улучшения воспроизведения характеристик приземного слоя атмосферы в расчетах по воспроизведению современного климата.

Проделанная работа и полученные результаты являются свидетельством высокой научной квалификации, а также задают хороший задел для дальнейших исследований. В процессе работы А.В. освоил методы численного моделирования турбулентности (DNS, LES, RAMS), работу с моделью Земной системы ИВМ РАН и самостоятельно провел все используемые в работе вычисления.

Диссертант глубоко погрузился в область исследований, причем освоил не только теоретические, но и экспериментальные методы исследования атмосферной турбулентности, принимая участие в экспериментальных работах лаборатории взаимодействия атмосферы и океана. Он активно участвовал в отечественных и международных конференциях, выступал на семинарах, участвовал в работе по темам Госзадания ИФА РАН, в двух проектах РНФ, в работах по хоздоговорам.

Выполненная Андреем Владимировичем работа характеризует его как квалифицированного специалиста, владеющего необходимым математическим и физическим аппаратом, способного самостоятельно проводить научные исследования, получать новые результаты и критически их анализировать.

Считаю, что диссертация Д.В. Дебольского представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне, и отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 – науки об атмосфере и климате.

Научный руководитель
Д.Ф.-м.н.

Д.В. Дебольский

И.А. Репина

Подпись Репиной И.А. заверяю
Ученый секретарь ИФА РАН
Ю.В. Киселева

Ю.В. Киселева

