

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Дебольского А.В. «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

Как следует из реферата, целью диссертационной работы А.В. Дебольского является аналитический обзор и анализ методов описания динамики конвективного и устойчиво-стратифицированного атмосферных пограничных слоев атмосферы, их валидация на основе результатов многочисленных численных экспериментов, выполненных с помощью вихреразрешающих моделей АПС (LES моделей, разработанных в НИВЦМГУ и ИВМРАН) и, как результат, разработка параметризаций турбулентного обмена для крупномасштабных моделей общей циркуляции атмосферы, в частности для модели Земной системы (МЗС ИВМ РАН). Таким образом автором диссертационной работы была поставлена и успешно решена задача с достаточной степенью адекватности совместить результаты исследований в области физики пограничного слоя атмосферы с проблемами вычислительной математики, связанными с недостаточным для воспроизведения тонких пограничных слоев сеточным разрешением по вертикали, характерным для глобальных моделей типа МЗС. Действительно, использование более точных и физически обоснованных схем описания физических процессов в АПС, базирующихся на результатах Large-Eddy Simulation (LES), дает надежду на улучшение прогнозов погоды и климата. Однако, проблемы необходимых вычислительных ресурсов и машинного времени обуславливают задачу выбора оптимальных параметризаций, которые лучше и быстрее работают в совместном режиме с другими блоками прогностических моделей.

Интегральная модель конвективного пограничного слоя, основанная на осредненных по высоте уравнениях притока тепла и баланса кинетической энергии турбулентности (КЭТ) кратко описана во второй главе. Для получения эволюционного уравнения для коэффициента вовлечения используется интегральное уравнение баланса КЭТ и теория самоподобия Дирдорфа. Представляет интерес временной ход обезразмеренного интеграла КЭТ в зависимости от выбора интегральных масштабов для нормировки, приведенный на рис.2. К сожалению, объем и стиль изложения, присущий авторефератам, не позволяет подробно проанализировать приведенный на рисунке временной ход интеграла КЭТ в зависимости от выбора интегральных масштабов, так и оценить надежность выводов, приведенных в разделе 2.3, носящих во многом декларативный характер.

Третья глава посвящена исследованию замыканий первого порядка при моделировании устойчиво стратифицированного АПС. Проанализировано 7 функций устойчивости, используемых в одномерных моделях устойчиво стратифицированного АПС и их зависимость от градиентного числа Ричардсона. Показано, что наилучшее согласие с результатами LES имеет место при использовании функции Бузингера-Дайера. Представляют интерес представленные на рис. 4 профили относительной ошибки потоков тепла и импульса в пределах АПС для различных интегральных

функций устойчивости относительно потоков у поверхности, рассчитанных по данным LES и выполненный на его основе анализ. В частности представляется важным вывод о том, что для очень устойчивых АПС модели, основанные на линейных безразмерных градиентах скорости дают стремящиеся к нулю потоки при интегрировании начиная с высоты, равной половине высоты АПС, а функции с нелинейным градиентом скорости, основанные на эмпирических данных, только при достижении  $z/h \sim 1$ . Последнее может дать положительный эффект при использовании в моделях климата и прогноза погоды с грубым разрешением по высоте, уменьшая вероятность декаплинга АПС от подстилающей поверхности в случае сильно устойчивого АПС. Минусом использования таких функций (CB05, L79) в том, что они сильно переоценивают потоки вблизи подстилающей поверхности.

Четвертая глава посвящена внедрению новых замыканий первого порядка в МЗС ИВМ РАН и исследованию их влияния на воспроизведение моделью современного климата. К сожалению, из автореферата неясно, какие именно новые функции устойчивости ЕВ (вероятно, это русифицированное сокращение от Esau I. N., Byrkjedal), основанные на данных LES [28], «которые не приводят к чрезмерному перемешиванию и следуют правильному асимптотическому поведению, получаемому в теории и численных экспериментах при очень устойчивой стратификации», разработаны диссертантом. Можно предположить, что это модифицированный вариант замыкания EFB, обоснованию которого посвящен раздел 4.3. Поскольку функции ЕВ получены на основе многочисленных LES экспериментов по воспроизведению устойчивого АПС, в подразделе 4.3.1 описана возможность и выполнена оптимизация констант на расширенном наборе LES-данных, необходимая для улучшения результатов моделирования. Для оценки адекватности воспроизведения устойчивого АПС автором диссертации были выполнены дополнительные численные эксперименты, перекрывающие возможный интервал интегральной устойчивости.

В заключительных подразделах приведены результаты использования параметризаций, предложенных автором в численных экспериментах по воспроизведению современного климата моделью МЗС ИВМ РАН, показавшие, при сопоставлении с данными реанализа ERA-5, существенное улучшение ряда характеристик полярной атмосферы в модифицированной версии модели.

В качестве замечаний можно отметить противоречащее ранее сказанному последнее предложение четвертого раздела: «Однако, эксперименты с дополнительно оптимизированными параметрами замыкания, не показывают значимого улучшения относительно версии модели с оригинальными константами». Кроме этого, по субъективному мнению автора отзыва известным недостатком диссертации является, насколько можно судить по автореферату, отсутствие каких-либо сравнений с данными натурных наблюдений. Даже сравнение с данными реанализа ERA-5 – это тоже сравнение с модельными результатами, часто, по крайней мере в полярных районах, недостаточно корректно описывающими реальные метеорологические условия. Имеет место ряд погрешностей редакционного характера. Например, в подрисуночной подписи рис.6 указано «Средняя ошибка относительно ERA5 для INMCM (слева) и INMCM+EB (справа, так в тексте) в поле приземной температуры». В тоже время эти два рисунка расположены друг под другом.

Однако, указанные замечания не принципиальны и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертационной работы. Автор диссертационной работы Дебольским А.В. была поставлена и успешно решена задача с достаточной степенью адекватности совместить результаты многочисленных исследований в области физики пограничного слоя атмосферы с задачами вычислительной математики, связанными с недостаточным для воспроизведения тонких пограничных слоев сеточным разрешением по вертикали, характерным для глобальных моделей типа МЗС. Следует особо отметить, что разработанная диссертантом тема и полученные им результаты представляет интерес не только для практического использования при совершенствовании крупномасштабных моделей прогноза и климата, но и для научных исследователей и будущих метеорологов, изучающих динамику атмосферных мезомасштабных процессов.

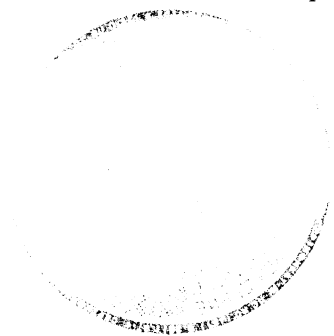
Автореферат диссертации написан на высоком научном уровне. В нем достаточно подробно излагается основное содержание диссертации, что позволяет с уверенностью утверждать, что она соответствует требованиям ВАК Минобрнауки России, а ее автор Дебольский Андрей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате.

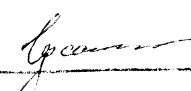
Д. ф.-м. н., с.н.с.,  
главный научный сотрудник отдела  
взаимодействия атмосферы и океана  
Арктического и антарктического  
научно-исследовательского института

  
Макштас Александр Петрович

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ФГБУ  
"ААНИИ"), Россия, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38, литера А, [www.aari.ru](http://www.aari.ru),  
[aaricoor@aaari.ru](mailto:aaricoor@aaari.ru), (812)337-3123

Подпись Макштаса А.П. заверяю



|   |               |
|---|---------------|
| Подпись(и)  | А.П. Макштаса |
| УДОСТОВЕРЯЮ   |               |
| УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ААНИИ  |               |
|  | М.А. ГУСКАВА  |