

## ОТЗЫВ

официального оппонента Чухарева Александра Михайловича, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» на диссертационную работу Барскова Кирилла Владиславовича «Структура атмосферного пограничного слоя над неоднородной поверхностью», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Представленная к защите диссертационная работа Барскова К.В. направлена на изучение важной проблемы взаимодействия атмосферного пограничного слоя с подстилающей поверхностью. **Актуальность данного исследования** обусловлена необходимостью точных оценок потоков тепла, импульса, влаги и различных примесей в приземном слое воздуха. Широко известная теория подобия Мони́на-Обухова в свое время была колоссальным достижением и с успехом до сих пор применяется для решения многих задач физики атмосферы. Тем не менее, идеализированные условия на нижней границе приземного слоя атмосферы в настоящее время уже не удовлетворяют возросшим требованиям к точности модельных расчетов. Одна из важнейших причин – естественные и искусственные неоднородности земной поверхности, которые, как известно, заметно меняют турбулентную структуру приземного слоя, в частности, в нем возникают вихри относительно крупных масштабов, тем самым влияя на интенсивность турбулентных потоков.

**Основные результаты и их новизна.** В соответствии с заявленной целью работы **в первой главе** подробно рассматриваются типы подстилающих поверхностей и делается обстоятельный обзор научных исследований, посвященных изучению энергообмена атмосферы с земной поверхностью. Показывается, что в используемых методах принимаются различные допущения, упрощающие расчеты, но тем самым не учитывающие важный элемент большинства поверхностей – наличие неоднородностей. В работе выделяются два типа поверхностей: ландшафты с гладкой топографической неоднородностью и с разрывной топографической неоднородностью. Автором описаны, с привлечением значительного количества источников, особенности физических процессов для каждого из типов ландшафта и показана важность таких исследований при моделировании погодных и климатических явлений, в т.ч. и глобального изменения климата. На конкретных цифрах продемонстрировано, что ландшафты с неоднородностями разрывного типа – очень часто встречающийся вид земной поверхности, поэтому крайне важен объективный анализ особенности обменных процессов приземного слоя атмосферы с такими поверхностями.

Следует отметить с положительной стороны хорошее изложение в первой главе методов экспериментального исследования турбулентных потоков, где наряду с лаконичностью дается четкое определение трех основных физических и математических подходов для исследования этих сложных процессов. Особое внимание уделено объяснению дисбаланса тепловой энергии, проявляющемуся при инструментальных измерениях, и показано, что использование современной точной аппаратуры и учет адвективных процессов наряду с наличием крупных вихрей, устраняет это расхождение между методом теплового баланса и прямыми измерениями.



**Вторая глава** диссертации посвящена изучению атмосферного пограничного слоя над ландшафтом с гладкой топографической неоднородностью.

Основываясь на теории подобия Монина-Обухова, автором предлагается модификация масштаба длины, адаптированного к конкретной поверхности, но с сохранением вида универсальных функций. Исходя из анализа данных натурных измерений на 127-метровой метеорологической мачте, показано, что введение такого масштаба турбулентности, зависящего от топографии уникальной структуры ландшафта, позволяет использовать основные представления теории подобия для более объективных оценок турбулентных потоков. Влияние стратификации и высоты атмосферного пограничного слоя также учитывается в этом модифицированном масштабе длины.

Достаточно большой экспериментальный материал позволяет с определенной степенью уверенности говорить о правомерности такого подхода для повышения точности расчетов. Приведенные иллюстрации наглядно демонстрируют, что безразмерный градиент скорости становится практически постоянным по высоте при использовании предложенного масштаба в отличие от стандартного метода расчета. Немалый разброс экспериментальных точек вполне объясним: во-первых, при измерениях турбулентных пульсаций, особенно в натуральных условиях, вряд ли можно ожидать устойчивых значений статистических моментов, во вторых, как правильно отмечено автором, максимальный разброс наблюдается в верхней части погранслоя, где действительно крупные вихри доминируют, и влияние стратификации сказывается на них особенно явно.

**В третьей главе** диссертационной работы рассматривается особенность энергообмена над ландшафтом с разрывной топографической неоднородностью. Представлены экспериментальные исследования в районах резкого изменения типа подстилающей поверхности, а именно: заснеженная поверхность замерзшего озера и лесной массив. Весьма подробно описаны два отличных по расположению и локальным условиям объекта исследований и используемая аппаратура, особое внимание автором уделено оценкам погрешностей, отмечено, что невысокая точность градиентного метода оценки потоков тепла, влаги и импульса позволяет лишь рассматривать его с точки зрения общей тенденции изменения потока и сравнивать по порядку величины. Метод же теплового баланса дает ошибку около 20%, что считается неплохим показателем при такого рода измерениях.

Сравнение двух методов – прямого и балансового – показывает их неплохое соответствие, коэффициент корреляции составлял 0,6. Меньшие значения потока, получаемые путем измерения флуктуаций, согласуются с данными других авторов. Особого внимания заслуживает попытка автора применить статистический момент третьего порядка для оценки влияния крупномасштабных вихрей. Как известно, когерентные структуры, формирующиеся во многих турбулентных течениях, могут переносить более половины всей энергии потока, поэтому в настоящее время их описанию уделяется повышенное внимание. На экспериментальном материале показано, что теория Монина-Обухова не соответствует прямому методу оценки потока для ситуации, когда имеется резкая ступенька, переход от одного типа поверхности к другому. При этом третий момент – адвективный перенос турбулентного потока – заметно больше, чем в случае с направлением ветра без такого резкого перехода. Таким образом, относительно простой подход для оценки влияния когерентных структур на турбулентный перенос



тепла либо другой субстанции может быть весьма полезен и использоваться для практических расчетов.

Кроме многих достоинств, в работе имеются и определенные недостатки.

1. Введенный по аналогии с гипотезой Обухова масштаб для описания турбулентности над поверхностью с гладкой топографической неоднородностью вряд ли будет универсальным при различной динамике воздушного потока. Причина – наличие только одной твердой границы в отличие от случаев, рассмотренных А.М. Обуховым, где конфигурация канала и определяла главным образом характеристики развитой изотропной турбулентности. Здесь же размеры вихрей (следовательно, и интенсивности турбулентности), по-видимому, могут в большой степени зависеть от скорости потока и степени развития турбулентности, которую в природных условиях обычно трудно оценить.

2. К сожалению, в приведенных экспериментальных данных отсутствуют необходимые элементы статистического анализа, в частности, не показан доверительный интервал на рис. 2 и рис. 4. Аппроксимация по методу наименьших квадратов случайных величин не является однозначной величиной, поэтому такие оценки нужны. Было бы неплохо привести и фрагменты рядов исходных данных: температуру, скорость и направление ветра, по ним обычно видно каков разброс данных, наличие (отсутствие) тренда и проч. Это бы придало большую информативность и наглядность обсуждаемым экспериментальным результатам.

3. В параграфе 3.4.1 в уравнении (3.30) не определены величины  $k$  и  $\vartheta$ , в перечне обозначений  $\vartheta$  также нет, при этом нет ссылки на первоисточник. Можно лишь предположить, что это коэффициенты температуропроводности и вязкости, но в перечне обозначений под  $k$  понимается постоянная Кармана. Хотя в предыдущих параграфах при выводе уравнений приводятся даже правила осреднения Рейнольдса, то здесь ключевое уравнение выписано сразу в конечном виде. Вызывает некоторые сомнения и интерпретация члена (VI) в уравнении (3.30), если он выписан правильно. В моделях турбулентности для стратифицированных сред кроме уравнения переноса для смешанных моментов (скорости и температуры) используется также уравнение для вторых моментов пульсаций температуры. Следовало бы обосновать использование лишь одного уравнения.

4. К сожалению, оставляет желать лучшего физическая интерпретация третьего статистического момента, хотя при анализе измерений ему уделено достаточно много внимания.

5. К техническим неточностям можно отнести одинаковые номера у двух параграфов в первой главе, встречаются отдельные стилистические недоработки и опечатки, хотя надо признать – в очень малом количестве. Немного смутила большая буква  $B$  в индексе модифицированного масштаба длины в формулах (2.9) и (2.10). Либо это опечатка, либо еще один параметр? На с. 85 указана неверная ссылка на формулу (2.1). По-видимому, имелась в виду формула (3.30).

Тем не менее, работа в целом производит хорошее впечатление, она правильно структурирована, сформулированы ясные задачи, сделаны четкие выводы по каждой главе. Полученные результаты полезны и в практическом плане и для формирования направлений для дальнейших исследований.

Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию.

Считаю, что представленная диссертационная работа Барскова К.В. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Официальный оппонент,**

ведущий научный сотрудник отдела турбулентности  
Федерального государственного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра  
«Морской гидрофизический институт РАН»,  
доктор физико-математических наук

Чухарев Александр  
Михайлович

02.11.2020 г.

**Организация:** Федеральное государственное учреждение науки, Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН».

**Адрес:** Капитанская ул., д. 2, г. Севастополь, 299011. Тел./факс (8-692) 54-52-41,

**E-mail:** [office-mhi@mail.ru](mailto:office-mhi@mail.ru)

Подпись Чухарева Александра Михайловича удостоверяю  
Заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ  
доктор физико-математических наук



А.И. Кубряков