

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

“Параметры и структура волн Кельвина-Гельмгольца в атмосферном пограничном слое по данным содарного зондирования”,

представленную Люлюкиным Василием Сергеевичем

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 25.00.29 – “Физика атмосферы и гидросферы”

Диссертационная работа В.С.Люлюкина посвящена обобщению данных многолетнего акустического зондирования волн Кельвина-Гельмгольца (ВКГ) в пограничном слое контрастных по климату и характеру подстилающей поверхности географических регионов. **Актуальность** темы сомнений не вызывает, поскольку неустойчивость Кельвина-Гельмгольца представляет собой один из механизмов вертикального перемешивания в условиях устойчивой стратификации. Математическое описание статистических моментов, в первую очередь, вертикальных турбулентных потоков, при устойчивой стратификации, и их параметризация в моделях прогноза погоды и Земной системы, является одной из основных проблем теории геофизической турбулентности на протяжении, как минимум, полувека. В ВКГ турбулентность возникает на локальных сдвигах скорости, что подтверждено натурными, лабораторными экспериментами и вихреразрешающим моделированием. При этом, параметризация перемешивания, вызванного ВКВ, к настоящему моменту времени, по-видимому, не создана; по крайней мере, подобные параметризации не включены в моделях прогноза погоды и климата. В этой связи, очень ценным представляется накопление статистики по повторяемости эпизодов ВКВ при различных режимах течений атмосферного пограничного слоя (АПС) и в различных географических регионах, чему и посвящена настоящая работа.

Новизна работы. В настоящей работе впервые собрана статистика случаев наблюдения и основных параметров ВКВ за многолетний период в Московском регионе. Пожалуй, основным и впервые защищаемым положением работы является утверждение о повсеместной распространённости явлений ВКВ при устойчивой стратификации в любое время года. Предложен оригинальный метод композитного анализа содарных данных. Важным результатом работы представляется также установление слабой зависимости основных параметров ВКГ от характера статистически однородной поверхности (т.е. фактически от коэффициента шероховатости).

Достоинства работы. Работа в целом хорошо структурирована и написана чётким языком, не допускающим двусмысленного толкования. В конце каждой главы даётся краткое обсуждение её основных результатов. Работа снабжена обширным иллюстративным материалом, по которому читатель может проверить утверждения автора. В работе очень хороший обзор литературы, включающий ссылки на ключевые работы.

Диссертационная работа состоит из четырёх глав, введения, заключения и списка литературы, включающего 107 наименований. Общий объём работы – 127 стр.

Во **Введении** обосновывается актуальность исследования, ставятся цели и задачи, тезисно излагаются методы исследования, формулируются основные положения, выносимые на защиту, представлена научная новизна, научная и практическая значимость, перечислены мероприятия, на которых доложены основные результаты (апробация работы), даётся список опубликованных работ, уточняется личный вклад соискателя в работе.

Главе 1 представляет собой обзор мирового состояния исследований ВКГ в АПС, с акцентом на дистанционные, с особенностями, акустические методы измерений.

В **Главе 2** приводятся физические принципы акустического зондирования, методика измерений, конструктивные особенности содаров, рассмотрены вопросы интерпретации эхограмм. Представлены особенности содаров, разработанных в ИФА им. А.М.Обухова РАН, описаны точки стационарных, а также экспедиционных измерений, используемых в последующем анализе.

Глава 3 является центральной частью диссертации. Здесь излагаются оценки повторяемости, суммарной длительности, временным периодам и длинам ВКГ в Московском регионе. Представлено распределение случаев ВКГ по сдвигу ветра и по временам года. Показано, что статистическая связь длины ВКГ и её амплитуды хорошо согласуется с теоретическими и лабораторными работами. Приводится также статистика ВКГ по синоптическим условиям в пункте наблюдений.

Глава 4 содержит описание и результаты применения нового композитного метода построения акустической отражаемости и поля скорости в ВКГ.

В **Заключении** кратко представлены основные выводы работы.

Отметим следующие **замечания**.

- 1) Задачи на стр. 7 сформулированы как полученные результаты
- 2) утверждение на стр.8, что “ВКГ являются неотъемлемым свойством структуры приземных инверсий” слишком сильное, т.к. в самой работе показано, что ВКГ наблюдаются при устойчивой стратификации не всегда. Кроме того, данные измерений, привлечённые в работы, хоть и собраны в контрастных по климату и особенностям местности условиях, но

далеко не исчерпывают всего многообразия режимов АПС на Земле. Например, не охвачены тропические АПС, и т.д.

3) защищаемые положения 2 и 3 могут быть объединены

4) в работе для определения пространственных масштабов ВКГ используется приближение “замороженной турбулентности”, т.е. гипотеза о том, что ВКГ переносятся только средней скоростью потока, в то время как в общем случае необходимо также учитывать фазовую скорость самих волн, известную из теоретических работ (о чём пишет сам автор на стр.15).

5) на стр.45 автор сообщает, что после улучшения визуализации результатов содарных измерений удалось повысить количество зарегистрированных случаев ВКГ почти в 5 раз. При этом возникает вопрос, насколько уверенно можно относить некоторые структуры в поле отражаемости именно к ВКГ? Например, если на рис. 2.8в волновые структуры типа “гребней” прослеживаются уверенно, то на рис. 2.9 (или рис. 3.7в) неоднородность отражаемости можно отнести к общему случаю перемежаемой турбулентности или когерентных структур в устойчивом погранслое, которым посвящено множество работ. То есть, замечание сводится к вопросу: как отделить в содарных данных ВКГ от других типов перемежаемой турбулентности?

6) в главе 3 (рис. 3.5) приведено распределение повторяемости эпизодов ВКГ по значениям сдвига ветра. К сожалению, здесь (и нигде в работе) не привлекаются данные о вертикальном распределении температуры при анализе повторяемости и характеристик ВКГ. Это тем более требует пояснения, что сам автор неоднократно упоминает роль стратификации в генерации ВКГ во вводных главах (например, условие $Ri < \frac{1}{4}$).

7) в главе 4 по данным содарного зондирования восстанавливается поле скорости в ВКГ. Возникает вопрос: каково горизонтальное разнесение точек отражения сигнала для 3-х антенн на разных высотах отражения по сравнению с длиной ВКГ и размерами основных её структурных элементов (например, ширины “шнуров”)?

8) также к главе 4: непонятно, почему в ВКГ анализируется только двумерное поле скорости; если поперечная компонента скорости мала, то достаточно было бы дать оценки её значений.

9) представляется, что результаты композитного построения поля скорости в ВКГ в главе 4 могут быть проанализированы более содержательно с физической точки зрения. Так, можно сопоставить поле отражаемости с квадратом тензора деформации скорости (мера генерации турбулентной кинетической энергии). Напрашивается также расчёт по полю скорости в ВКГ потока импульса, который этими структурами осуществляется, и далее – коэффициента турбулентной вязкости с использованием профиля средней скорости. Такие оценки уже имели бы прямой выход на проверку турбулентных замыканий. Эти замечания, однако, можно трактовать как пожелания на будущее.

Редакционные замечания:

- не все аббревиатуры расшифрованы при их первом использовании (например, “ЗНС” на стр.8),
- в Главе 4 для описания движения внутри ВКГ применяется термин “циркуляция воздушных масс”, который представляется неудачным из-за совпадения с термином “воздушные массы” в синоптической метеорологии,
- на стр. 35 даётся ссылка на рис. 3.2, в то время, как должен быть, по-видимому, рис. 2.4,
- на стр. 58 упоминается, что, согласно теореме Говарда о полуокружности, необходимым условием развития ВКГ служит критерий $Ri < 1/4$. В действительности, это утверждение теоремы Майлза,
- в главе 3 не уточняется, данные какого именно реанализа используются и какой источник синоптических карт,
- на рис. 4.3 из подрисуночной подписи невозможно понять графики а и б, возможно, их нужно поменять местами.

Изложенные выше замечания не умаляют значимости полученных результатов, не ставят под сомнение квалификационный уровень соискателя и не сказываются на положительном впечатлении от работы в целом.

По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, реферативные базы Web of Science и Scopus. Результаты работы доложены на значительном количестве всероссийских и международных конференций, в т.ч. на специализированных сериях конференций по тематике работы, а также на семинарах ведущих российских институтов в области физики атмосферы и прогноза погоды.

Текст автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертация соответствует паспорту специальности 25.00.29 – “Физика атмосферы и гидросферы”, требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор В.С.Люлюкин заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – “Физика атмосферы и гидросферы”.

Ведущий научный сотрудник

Научно-исследовательского вычислительного центра (НИВЦ)

Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова”,

кандидат физико-математических наук по специальности

25.00.30 – «метеорология, климатология, агрометеорология»,



11.01.2019

Степаненко Виктор Михайлович

119234, г. Москва, Ленинские горы ул., д.1., стр.4

Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В.Ломоносова

тел.: +7(495) 939-23-53, e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

Я, Степаненко Виктор Михайлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

11.01.2019

«Подпись ведущего научного сотрудника НИВЦ МГУ Степаненко В.М. удостоверяю»:

Директор

Научно-исследовательского вычислительного центра

МГУ имени М.В.Ломоносова,

доктор физико-математических наук,

профессор



Тихонравов Александр Владимирович