

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ
им. А.М. ОБУХОВА

На правах рукописи

УДК 551.501.796; 551.551.2; 551.510.522; 532.59

Люлюкин Василий Сергеевич

ПАРАМЕТРЫ И СТРУКТУРА ВОЛН
КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА В АТМОСФЕРНОМ
ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПО ДАННЫМ СОДАРНОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ

Специальность 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., профессор
М.А. Каллистратова

Москва

2018

Оглавление

Оглавление	2
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ВОЛНЫ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ	14
1.1 Физическое описание ВКГ	15
1.2 Исследования ВКГ в атмосфере методами наземного дистанционного зондирования	19
1.3 Актуальные направления исследований ВКГ в атмосфере	25
1.4 Выводы из Главы 1	28
2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ВОЛН	29
2.1 Метод акустического зондирования атмосферы	29
2.1.1 Физические основы метода акустического зондирования атмосферы	31
2.1.2 Практическая реализация метода акустического зондирования	35
2.2 Технология содарного зондирования для исследования ВКГ	38
2.2.1 Базовая конструкция содара	38
2.2.2 Принципы обработки эхосигнала	41
2.2.3 Идентификация внутренних волн в АПС на содарных эхограммах	43
2.3 Описание используемой аппаратуры и измерительных пунктов	47
2.3.1 Содары	47
2.3.2 Измерительные пункты	49
2.4 Выводы из Главы 2	51
3. КЛИМАТОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ВОЛНАХ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА	53
3.1 Статистика параметров ВКГ по содарным данным	53
3.2 Пространственные масштабы пакетов ВКГ	62
3.3 Синоптические условия, благоприятствующие возникновению ВКГ в АПС	70

3.4	ВКГ в Антарктике, в аридных и прибрежных регионах	78
3.4.1	Волны в антарктическом АПС	78
3.4.2	Волны в аридных и степных районах	80
3.4.3	Волны в АПС в прибрежных регионах	82
3.5	Выводы из Главы 3	86
4.	ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ВОЛН КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА	89
4.1	Метод композитного анализа содарных данных	89
4.1.1	Выбор данных для анализа внутренней структуры ВКГ	90
4.1.2	Применение метода композитного осреднения	91
4.1.3	Интерпретация композитной структуры ВКГ	95
4.2	Структура возмущений ветрового поля внутри ВКГ	98
4.2.1	ВКГ в низкоуровневых струйных течениях над равниной	98
4.2.2	ВКГ в верхней части кatabатических течений над заснеженным склоном	99
4.3	Пространственная динамическая структура ВКГ	104
4.4	Выводы из Главы 4	106
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
	Список литературы	111
	Список иллюстраций	124
	Список таблиц	127

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена экспериментальному исследованию структуры и свойств волн Кельвина-Гельмгольца (ВКГ) в атмосферном пограничном слое (АПС), а также статистическому обобщению характеристик ВКГ в различных климатических регионах. В качестве основного метода идентификации волн и количественного определения параметров волновых структур используется дистанционное акустическое зондирование АПС с поверхности Земли. Моностатические доплеровские акустические локаторы (сонары), эхо-сигнал которых вызывается рассеянием звука на мелкомасштабных турбулентных неоднородностях температуры воздуха, позволяют визуализировать мезомасштабную вертикальную структуру АПС до высоты нескольких сотен метров и наблюдать волны в поле флуктуаций показателя преломления звука, а также в поле флуктуаций скорости ветра. Измерения частотных и амплитудных характеристик эхо-сигнала сонара позволяет (при привлечении некоторых сопутствующих измерений) оценить амплитуды и периоды волн, определить структуру волновых пакетов, их длительность и высоту расположения, оценить скорость и направление их перемещения, наблюдать динамику зарождения и распада волн. Внутренние гравитационные волны (ВГВ) с периодами от десятков секунд до десятков минут отличаются большим разнообразием форм и свойств, связанных с их происхождением и стратификацией АПС. Способность сонаров наглядно визуализировать форму волн позволяет отличать гравитационно-сдвиговые волны, образующиеся в низкоуровневых струйных течениях от волн плавучести, захваченных приповерхностными волноводами. Основное внимание при исследованиях было уделено внутренним гравитационно-сдвиговым волнам типа волн Кельвина-Гельмгольца, поскольку они являются наиболее распространенными и в

инверсионных условиях образуются повсеместно, независимо от орографических препятствий, т.е. даже над ровной однородной поверхностью.

Актуальность темы. Рост количества антропогенных загрязняющих примесей в атмосфере вызывает увеличение спроса на системы мониторинга и прогнозирования переноса загрязнений. Исследование механизмов обменных процессов, действующих при различных метеорологических условиях, необходимо для совершенствования климатических моделей и для моделирования распространения загрязняющих примесей. Кроме того, обменные процессы в АПС играют определяющую роль в формировании погоды и климата, влияют на распространение электромагнитных и звуковых волн, воздействуют на эффективность ветроэнергетики и безопасность авионавигации. Разработка и эксплуатация прогностических численных моделей требуют параметризации обменных процессов в АПС. Для параметризации неустойчивого и нейтрально стратифицированного АПС в течении десятилетий достаточно успешно используется теория подобия Монина-Обухова, которая позволяет по стандартным данным о метеорологических параметрах определять необходимые характеристики турбулентного обмена в АПС. Но в устойчиво-стратифицированном АПС до сих пор, несмотря на многочисленные исследования, физические процессы массо и теплообмена остаются недостаточно понятыми, плохо определяемыми и не поддающимися универсальной параметризации [см., например, 22; 54; 84]. Известно, что слои приземных и приподнятых инверсий являются сильно турбулизированными (что подтверждается средствами дистанционного зондирования и оптическими абберациями при наземных астрономических наблюдениях), однако механизм генерации турбулентности при статически устойчивой стратификации до конца не объяснен. Одна из гипотез отводит основную роль в этом явлении волновым процессам, предполагая, что модуляция волнами

изначального поля турбулентности и перенос турбулентности волновыми движениями, а также генерация добавочной турбулентности при обрушении волн за счет нелинейности, могут обеспечить наблюдаемые значения интенсивности турбулентности.

Теоретические исследования внутренних гравитационных волн (подразделяемых на бегущие волны плавучести (БВП) и гравитационно-сдвиговые волны (ГСВ)), необычайно сложны вследствие нелинейности таких волновых движений. До настоящего времени не только не существует доступных аналитических оценок параметров БВП и ГСВ, но даже нет общепринятого мнения о степени влияния волновой активности различных типов на интенсивность турбулентности и обменные процессы в статически устойчивом АПС. Несмотря на многочисленные примеры наблюдений ВГВ в атмосфере, данные натурных исследований этого явления в пограничном слое обычно представляют собой разрозненные описания отдельных эпизодов волновой активности, не позволяющие провести статистический и климатологический анализ и оценить значимость ВГВ как возможного источника или модулятора турбулентности. Более того, большое разнообразие видов наблюдаемых волн, различие условий и средств наблюдения даже не позволяет однозначно классифицировать различные структуры и однозначно отнести к ВГВ того или иного типа или к определенному виду вмороженной турбулентности, модулированной в результате волновых или переходных процессов. Структуры в виде наклонных полос или гребней, регулярно наблюдаемые на пространственно-временных эхограммах средств наземного зондирования, различные авторы относят и к захваченным волнам, и к вмороженным следам в поле турбулентности, и к ВКГ (причем в данном случае нет единого мнения о правомерности использования термина “волны

Кельвина-Гельмгольца” в условиях, когда вертикальный профиль плотности среды является непрерывным).

К настоящему времени внутренним гравитационным волнам в АПС посвящено несколько сотен журнальных публикаций и отдельные главы в специальных монографиях [см., например, 2; 81]. Однако, несмотря на это, проблемы генерации ВКГ, определения их свойств и характеристик, нахождения их связи со средними метеорологическими параметрами и взаимодействия с турбулентностью пока еще далеки от своего решения. Для приближения этих решений требуются систематические экспериментальные исследования.

Целью настоящей работы является исследование параметров и внутренней структуры волн Кельвина-Гельмгольца на основе данных многолетнего мониторинга пограничного слоя атмосферы с помощью акустических локаторов (содаров).

В соответствии с поставленной целью были решены следующие задачи:

- 1) Разработаны методы содарной регистрации и определения параметров ВКГ, соответствующие разным режимам работы аппаратуры.
- 2) Проведены долговременные (в течение 5-и лет) непрерывные измерения параметров атмосферного пограничного слоя на сети содарного мониторинга в Московском регионе, а также краткосрочные измерения в экспедициях в степных, аридных и прибрежных регионах.
- 3) Для повышения высотного и временного разрешения зондирования частично модифицирована аппаратура, а также алгоритмы управления режимом работы содара и первичной обработки данных.
- 4) Создан архив данных по зарегистрированным эпизодам ВКГ в Московском регионе с 2008 года и в ходе экспедиций в 2012-2016 годах,

содержащий эхограммы, первичные данные, данные сопутствующих измерений и основные пространственно-временные параметры волн.

- 5) Исследована статистика наблюдаемых пространственно-временных параметров ВКГ по круглогодичным наблюдениям на ЗНС.
- 6) Получена статистика пространственно-временных масштабов цугов ВКГ по данным синхронного содарного мониторинга АПС в 3-х стационарных пунктах дистанционного зондирования в Москве и Московской области.
- 7) Исследована связь частоты наблюдения ВКГ с синоптической ситуацией.
- 8) Разработан метод получения тонкой структуры ветрового поля в периодических турбулентных структурах по содарным данным на основе композитного анализа.
- 9) Исследована внутренняя динамическая структура ВКГ, и её связь со средними профилями скорости ветра.

Научная новизна работы заключается в следующем: Объем исследованного материала — несколько тысяч часов содарных и сопутствующих наблюдений параметров АПС — позволил получить уникальную статистику и максимально обобщить оценки параметров ВКГ. С помощью разработанных способов регистрации и описания гравитационно-сдвиговых волн была зафиксирована распространенность явления, а так же широкий диапазон временных и пространственных параметров наблюдаемых волн. Результаты исследования опровергают представление о гравитационно-сдвиговых волнах в АПС, как о редком феномене, проявляющемся при экстремальных метеорологических условиях. Анализ обширного экспериментального материала показал, что ВКГ являются неотъемлемым свойством структуры приземных

инверсий, распространены повсеместно и могут наблюдаться круглогодично, что значительно увеличивает роль исследований ВКГ в понимании динамики статически устойчивого АПС и модернизации его численных моделей. Предложенный оригинальный метод композитного анализа содарных данных позволил показать завихренность ветрового поля внутри цугов ВКГ.

На защиту выносятся:

- 1) Методы регистрации и определения параметров ВКГ по содарным эхограммам.
- 2) Статистика наблюдаемых параметров ВКГ по круглогодичным наблюдениям на ЗНС.
- 3) Статистика пространственно-временных масштабов ВКГ по данным сети содарного мониторинга в Московской области.
- 4) Описание синоптических ситуаций, сопутствующих наблюдению событий мезомасштабной волновой активности в Московском регионе.
- 5) Метод получения тонкой структуры ветрового поля в периодических турбулентных структурах по содарным данным на основе композитного анализа.
- 6) Описание структуры поля ветра внутри слоя ВКГ. Завихренность поля, и её связь со средним профилем ветра.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены в виде докладов на семинарах Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и ФГБУ “Гидрометцентр России”, на всероссийских школах-конференциях молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические Эффекты” (Звенигород, 2012; Нижний Новгород, 2013; Шепси, Краснодарский край, 2015), на международных конференциях и школах:

Международная школа молодых ученых “Волны и вихри в сложных средах” (Москва, 2013), Международные симпозиумы по развитию дистанционного зондирования атмосферного пограничного слоя (16th ISARS, США, 2012; 17th ISARS, Новая Зеландия, 2014; 18th ISARS, Болгария, 2016; 19th ISARS, Германия, 2018).

По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых журналах, одна глава в книге и около 20 тезисов докладов и статей в сборниках трудов конференций.

Основные результаты диссертационной работы приведены в следующих статьях:

- 1) *Lyulyukin V., Kouznetsov R., Kallistratova M.* The composite shape and structure of braid patterns in Kelvin-Helmholtz billows observed with a sodar. *J. Atmos. Oceanic Technol.* — 2013. — V.30 — P. 2704–2711.
- 2) *Люлюкин В.С., Каллистратова М.А. и др.* Внутренние гравитационно-сдвиговые волны в атмосферном пограничном слое по данным акустической локации // *Изв. РАН, ФАО.* — 2015. — Т. 51 — С. 218–229.
- 3) *Каллистратова М.А., Люлюкин В.С. и др.* Содарные исследования волн Кельвина-Гельмгольца в низкоуровневых струйных течениях // С. 212–259 в книге: ”Динамика волновых и обменных процессов в атмосфере”. — М.: ГЕОС. — 2017. — 508 с.
- 4) *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Кузнецов Р.Д., Каллистратова М.А., Крамар В.Ф., Люлюкин В.Д. и др.* Оценка спиральности в атмосферном пограничном слое по данным акустического зондирования // *Изв. РАН, ФАО.* — 2017. — Т. 53, №2 — С. 200–214.
- 5) *Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Люлюкин В.С. и др.* Воздействие внутренних гравитационных волн на флуктуации метеорологических

параметров в атмосферном пограничном слое // Изв. РАН, ФАО. — 2018 — Т. 54 — С. 195–205.

- б) *Каллистратова М.А., Петенко И.В., Кузнецов Р.Д., Куличков С.Н., Чхетиани О.Г., Чунчузов И.П., Люлюкин В.С. и др.* Содарное зондирование атмосферного пограничного слоя: Обзор работ ИФА им. А.М. Обухова РАН // Изв. РАН, ФАО. — 2018. — Т. 54 — С. 283–300.

Личный вклад автора. Содержание диссертации является частью работы по развитию методов акустического зондирования и исследованию динамики АПС, проводимой в Радиоакустической лаборатории ИФА им. А.М. Обухова РАН. Автор принимал непосредственное участие в усовершенствовании аппаратуры и программ первичной обработки и представления содарных данных, в организации и проведении содарных измерений на научных станциях ИФА и в ходе полевых экспедиций. Автором самостоятельно разработаны методы регистрации и классификации ВКГ по содарным данным и метод композитного анализа для выявления тонкой структуры ветровых флуктуаций, а также проведена вся статистическая обработка полученных данных.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 127 страниц. Диссертация содержит 46 рисунков и 4 таблицы. Список литературы состоит из 107 публикаций.

Во введении обсуждается содержание исследований и их актуальность. Сформулирована цель работы, показана научная новизна и практическая ценность. Кратко изложено содержание диссертационной работы по главам и сформулированы основные научные результаты, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору мирового состояния исследований ВКГ в АПС. Охарактеризовано современное состояние проблемы, перечислены нерешенные научные задачи и актуальные направления исследований.

Во второй главе приведено описание используемой аппаратуры и методики измерений, а также обработки данных. В главе изложены физические основы действия содаров, рассмотрены вопросы интерпретации эхограмм и основные количественные соотношения. Приводится описание используемой аппаратуры и её различных модификаций, примеры регистраций волновых движений на содарных эхограммах. Кроме того, представлены описания стационарных измерительных пунктов сети содарного мониторинга в Московской области, а также экспедиционных пунктов содарных измерений, проводившихся в Антарктике, в степных, аридных и прибрежных регионах.

В третьей главе приводятся результаты исследований параметров ВКГ. Приводятся распределения суммарной длительности наблюдения эпизодов ВКГ, распределение временных периодов волн и распределение суммарной длительности наблюдения ВКГ по величине вертикального сдвига скорости ветра в низкоуровневых струйных течениях. Приведены статистические сопоставления эмпирических соотношений между длиной волны и амплитудой ВКГ с теоретическими оценками. Приводится статистика пространственно-временных масштабов пакетов ВКГ, полученная по данным синхронного содарного мониторинга АПС в 3-х стационарных пунктах дистанционного зондирования в Московском регионе. Исследуется связь частоты наблюдения ВКГ с синоптической ситуацией.

Четвертая глава посвящена исследованию внутренней структуры волн Кельвина-Гельмгольца в АПС. Приводится описание метода композитного анализа содарных данных. Приводятся расчёты вектора скорости ветра внутри волны, показана слабая завихренность поля возмущений скорости и циркуляция воздушных масс. Приведена оценка скорости циркуляции воздуха в волновом слое.

В Заключении подводятся итоги проделанной работы и перечисляются основные результаты исследования.

ГЛАВА 1

**ВОЛНЫ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА В АТМОСФЕРНОМ
ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ**

Настоящая глава носит вводный характер. В ней приведено описание проявлений в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое (АПС) квазипериодических волновых движений с длинами волн от сотни метров до нескольких километров; дана краткая историческая справка о наблюдениях и экспериментальных исследованиях таких волн; приведены примеры их визуализации с помощью современных средств наземного дистанционного зондирования; перечислены направления текущих экспериментальных исследований внутренних гравитационных волн (ВГВ) в АПС; показана их связь с актуальными проблемами прогноза погоды и качества воздуха, а также с практическими задачами ветроэнергетики и воздухоплавания.

Содержание главы ни в коей мере не претендует на полноценный обзор проблемы. Исследования ВГВ в атмосфере являются обширным разделом физики атмосферы, которому посвящены несколько специальных монографий [например, 2; 11; 81], большие разделы во многих монографиях по гидродинамике и динамической метеорологии [см., например, 16; 20; 32; 96; 107], а также несколько тысяч работ в научных журналах. Поэтому в задачи этой главы входит лишь обозначение предмета данного исследования и его места среди других экспериментальных работ той же направленности.

Существует множество различных типов атмосферных внутренних гравитационных волн. В атмосферном пограничном слое наиболее часто наблюдаются волны, вызванные неустойчивостью воздушного течения при вертикальных сдвигах скорости ветра. Такие волны регистрируются повсеместно при устойчивой температурной стратификации даже при отсутствии каких-

либо орографических препятствий или неоднородностей. Именно таким, гравитационно-сдвиговым, волнам уделяется основное внимание в данной работе.

1.1 Физическое описание ВКГ

Существование в нижней тропосфере мезомасштабных волнообразных структур (с длинами волн в диапазоне от сотни метров до нескольких километров) было известно ещё в позапрошлом веке по наблюдениям “завихренных” облаков. Примеры фотографий таких облаков с характерной завихренностью в верхней части приведены на Рис. 1.1. По-видимому, такие структуры образуются из-за неустойчивости воздушного течения при скачке плотности и скорости ветра на верхней границе облака и являются типичным примером волн Кельвина-Гельмгольца (ВКГ), названных по именам учёных, которые около 150 лет тому назад теоретически исследовали процесс образования ряби и барашков на водной поверхности под действием ветра [53; 64]. В последующих теоретических работах [36; 37; 50; 76; 77; 99] был выявлен ряд свойств атмосферных ВКГ:

- найден критерий необходимого условия существования ВКГ - критическое значение числа Ричардсона;
- показано, что длина волны и характер движения с максимальной линейной скоростью роста зависят от профилей средней скорости устойчивости;
- показано, что фазовая скорость движения ВКГ близка к средней скорости движения среды, из чего следует, что наблюдаемые волнообразные

структуры типа “кошачьих глаз” (cat’s eyes), либо “шнуров” (braids), являются скорее вихревыми образованиями (или вихревыми цепочками) в области неустойчивости сдвигового движения, чем распространяющимися волнами.

Кроме того, была выдвинута гипотеза, что обрушение ВКГ является основной причиной турбулентности и вертикального перемешивания в статически устойчивых средах [45]. Эта гипотеза подразумевает важную роль ВКГ в процессах турбулентного обмена в атмосфере, и необходимость учёта ВКГ при параметризации таких процессов. В результате появилось большое количество разнообразных теоретических моделей сдвиговых течений, а также лабораторных демонстраций образования и эволюции волн Кельвина-Гельмгольца.

Следует отметить, что до сих пор ни в российской, ни в зарубежной литературе нет устоявшейся терминологии для обозначения подобных волновых движений в безоблачной атмосфере. Во многих зарубежных публикациях рассматриваемые структуры именуется волнами Кельвина-Гельмгольца (ВКГ). В дальнейшем тексте также будет использоваться этот термин и аббревиатура при описании внутренних гравитационных волн, источником которых является сдвиговая неустойчивость течения. При этом важно отметить, что классические волны Кельвина-Гельмгольца являются лишь частным случаем гравитационных волн в сдвиговых течениях, который реализуется при скачкообразном разрыве плотности и скорости движения среды. В тропосфере подобных скачкообразных разрывов, как правило, не бывает, и потеря устойчивости течения и волнообразные структуры возникают при достаточно плавных изменениях плотности и скорости с высотой.

Сейчас общепризнано, что ВКГ образуются в результате потери стабильности течения под влиянием вертикального сдвига горизонтальной скорости



(a)



(б)

Рис. 1.1. Примеры фотографий валов Кельвина-Гельмгольца на верхней границе облаков. а) Тайвань, фотография Joshua Ho; б) мыс Фиолент, фотография Таисии Лазаревой.

течения в статически устойчивой среде. При этом осуществляется перенос энергии от среднего течения к волне, а в дальнейшем, при обрушении волны, к мелкомасштабным турбулентным флуктуациям. Вопрос об обратном влиянии мелкомасштабных флуктуаций в сдвиговых течениях на потерю стабильности до сих пор остаётся открытым. При развитии сдвиговой неустойчивости, могут образовываться квазипериодические структуры. При дистанционном зондировании атмосферы с помощью содаров, радаров или лидаров, эти структуры оставляют характерный рисунок на временной развертке эхосигнала. Схематические примеры таких эхограмм показаны на Рис. 1.2.

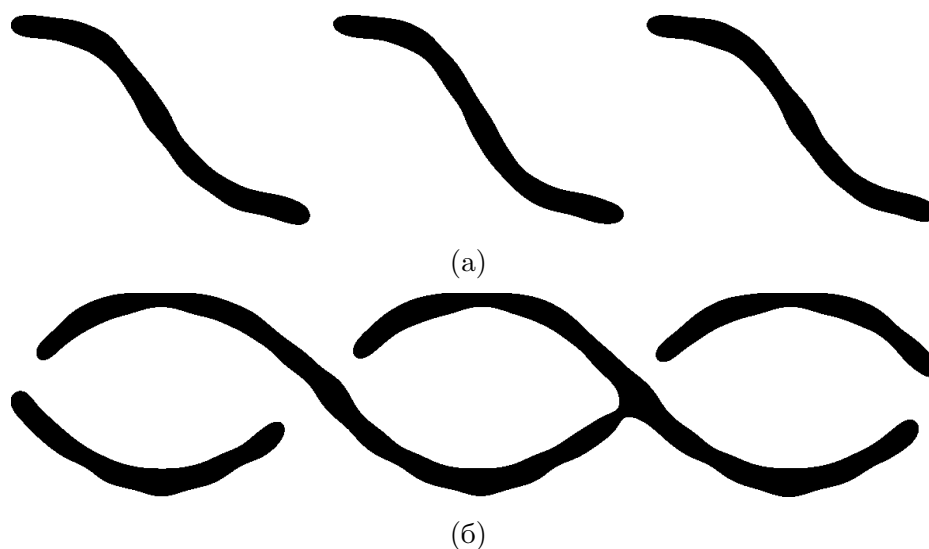


Рис. 1.2. Схематические изображения волн Кельвина-Гельмгольца, наблюдаемых на временных развертках эхосигнала при дистанционном зондировании атмосферы. а) - “шнуры” или “наклонные полосы” (braids) - самый распространённый вид ВКГ, регистрируемых с помощью содаров и радаров; б) - замкнутые структуры, т. н. “кошачьи глаза” (cat eyes).

В 1970–80-х годах было описано около десятка отдельных эпизодов наблюдения ВКГ в АПС, в том числе совместно с измерениями характеристик турбулентности [25; 27; 41; 57; 85]. Взаимодействие с турбулентностью в этих работах обсуждалось лишь на качественном уровне. В эти же годы начались лабораторные исследования волн в сдвиговых течениях в двухслойных и

трехслойных жидкостях [100; 101], которые продолжают и в настоящее время [71; 86]. Результаты исследований продемонстрировали хорошее согласие как с наблюдаемыми в облаках волнообразными структурами, так и с результатами численного моделирования ВКГ [2].

В последнее десятилетие увеличилось число наблюдений ВГВ различных типов в АПС при помощи лидаров [23; 24; 88]. Однако несмотря на интенсивное развитие средств наземного дистанционного зондирования, подавляющее большинство работ по этой тематике, опубликованных за последние десятилетия, посвящено либо математическим аспектам теории внутренних гравитационных волн, либо численному анализу гипотетических моделей [см., например, 15; 17; 19; 31; 45; 73; 87; 105]. Экспериментальных исследований ВКГ в нижней тропосфере было на порядок меньше, чем теоретических. Их результаты будут описаны в следующем разделе.

1.2 Исследования ВКГ в атмосфере методами наземного дистанционного зондирования

В безоблачном атмосферном пограничном слое (АПС) волновые структуры не наблюдались до появления средств наземного дистанционного зондирования (сонаров, радаров и лидаров), хотя во многих странах успешно проводились микробарографические исследования ВГВ в нижней и верхней тропосфере. По периодическим колебаниям давления волновой природы невозможно восстановить структуру и высоту расположения волнового пакета, поэтому ВКГ не могли быть выделены из общего массива наблюдений ВГВ всевозможных типов. Позднее, при проведении микробарографических записей одновременно с акустическим зондированием, флуктуации давления

были зарегистрированы во время появления волнообразных внутрислойных структур [55].

Объёмное рассеяние звуковых и радиоволн, регистрируемое содарами и радарам, происходит на мелкомасштабных (с размерами равными половине длины волны зондирующего излучения, составляющими несколько сантиметров) турбулентных неоднородностях показателя преломления [13; 18; 58]. Соответствие отображения ВГВ на эхограммах и реальных волновых структур было подтверждено лабораторными экспериментами [71; 86], а также регистрацией волнообразных структур такой же формы в поле скорости ветра и в поле сдвига скорости ветра [28; 82], и в настоящее время не вызывает сомнения.

Наибольшая часть наблюдений атмосферных ВКГ сделана на высотах 2–20 км и 50–100 км в ходе регулярного радиолокационного зондирования тропосферы, нижней стратосферы и ионосферы. Это связано с распространённостью сетей непрерывного мониторинга атмосферы импульсными СВЧ и ВЧ радарам, вертикальная разрешающая способность которых (100–200 м) недостаточна для исследования устойчиво стратифицированного АПС. Обширная статистика свойств и параметров ВКГ на этих высотах приведена в обзорах [47; 79]. В атмосферном пограничном слое наблюдений ВКГ немного, что, по-видимому, объясняется отсутствием сетевого мониторинга АПС и эпизодичностью дистанционного зондирования этого слоя. С 1968 года по настоящее время опубликовано лишь около полутора десятков свидетельств обнаружения пакетов ВКГ в АПС с помощью частотно-модулированных радаров, содаров и лидаров, которые имеют достаточно высокое разрешение по вертикали (2–20 м) для исследований волнообразных образований, и только в двух работах проведены сравнения результатов наблюдений ВКГ с теоретическими моделями, причем скорее качественные, чем коли-

чественные [26; 34; 39; 40; 82]. В Таблице 1.1 представлено большинство источников экспериментальных данных о ВКГ в АПС (по состоянию на 2012 год), включая те, которые были приведены в статье [47]. Для каждого случая представлены значения высоты середины волнового слоя, среднего вертикального сдвига ветра в слое, толщины волнового слоя и длины волны (или пространственного периода структур, рассчитанного на основе гипотезы Тейлора). Также представлено соотношение длины волны и толщины слоя, позволяющее проводить сравнение с результатами теоретических исследований, а также данными численных и лабораторных экспериментов (подробнее о результатах таких сопоставлений будет рассказано в Главе 3). В большинстве из цитируемых в Таблице 1.1 работ представлены данные лишь для одного-двух эпизодов наблюдения ВКГ, длительностью от нескольких минут до 1 часа. Из Таблицы 1.1 видно, что волны Кельвина-Гельмгольца в АПС наблюдаются наиболее часто на высотах 100–300 м, встречаются как при сильных, так и при слабых сдвигах ветра.

На Рис. 1.3 показаны образцы первых регистраций волн Кельвина-Гельмгольца в безоблачном АПС на радарных и содарных эхограммах в координатах высота - текущее время [30; 51; 52; 60]. Степень почернения на графиках соответствует степени интенсивности принятого локатором сигнала, вызванного обратным рассеянием радиоволн и звука на неоднородностях показателя преломления звука в воздухе. Поскольку интенсивность принятого сигнала прямо пропорциональна структурным характеристикам турбулентных флуктуаций температуры C_T^2 (для содара), либо влажности C_q^2 (для радара) [18], то, чем темнее изображение структуры на эхограмме, тем сильнее турбулизирована эта структура. На эхограммах чётко видны цуги волнообразных структур. На Рис. 1.3(а) показаны ВКГ в форме “кошачьих глаз” и “валов” (см. Рис. 1.2(а)), зарегистрированные частотно-модулированным

Таблица 1.1. Экспериментальные данные о волнах Кельвина-Гельмгольца в АПС.

Ссылка и измерительная аппаратура	Высота середины слоя H_0 , м	Сдвиг ветра, $\text{мс}^{-1}/100\text{м}$	Толщина слоя h , м	Длина волны L , м	Отношение L/h
Hicks and Angell, 1968 сканирующий радар	600	0.8	400	1500	3,75
Richter, 1969 FMCW радар	300	н/о	15	н/о	н/о
Atlas et al, 1970 FMCW радар	300	н/о (слабый)	50	230	4,6
Gossard et al, 1970 FMCW радар	200	н/о	100	~300	3,0
Cronenwett et al, 1972 содар	200	н/о	~100	3000	30
Emmanuel et al, 1972 содар	100	15	26	200	7,7
Emmanuel, 1973 содар	100	8	26	160	6,1
Hooke et al, 1973 содар	115	4.3	70	~300	4.3
Gossard et al, 1973 FMCW радар	560	н/о	50	370	7,4
Eymard and Weill, 1979 содар	160* 100** 160***	8 7.5 10	130 100 130	~1050 ~750 ~1090	8.1 7.5 8.4
Coulter, 1990 минисодар	100	4.0	~80	~500	6.25
Kallistratova, Petenko, 1993 минисодар	60	12	~50	~350	7.0
Newsom and Banta, 2003 лидар	50	17	~50	320	6.4
Hogan et al, 2002 сканирующий радар	1000	2.0	200	2000	10.0

*серия 2; **серия 3; ***серия 8; ****зарегистрировано 23.04.2009; н/о — не определен.

радаром в тонком слое приподнятой инверсии. На Рис. 1.3(б) и 1.3(в) показаны содарные эхограммы с ВКГ в виде ”кошачьих глаз”и ”наклонных полос”в слоях приподнятых инверсий. На Рис. 1.3(г) показаны “кошачьи глаза” в слое приземной инверсии, полученные с помощью содара с высоким пространственным (3,5 м) и временным (1 с) разрешением. Высоты расположения ВКГ, их амплитуды и периоды заметно отличаются друг от друга (масштабы высоты и времени на Рис. 1.3(а), (б), (в) и (г) различны), но формы этих волновых образований, занимающих всю толщину слоя приподнятой или приземной температурной инверсии, легко узнаваемы. Они совсем не похожи на близкую к синусоидальной форму бегущих внутренних гравитационных волн (волн плавучести), которые тоже эпизодически регистрируются на эхограммах в форме колебаний высоты границ инверсионных слоев. Изображение контура бегущих волн плавучести на эхограммах содаров, радаров и лидаров выглядит как однозначная функция текущего времени либо (для сканирующих устройств) расстояния, а изображение контура волн Кельвина-Гельмгольца - как двузначная функция. Изображения ВКГ, аналогичные приведенным на Рис. 1.3, были также получены автором при проведении содарных измерений на Звенигородской научной станции (ЗНС) и в экспедиционных условиях в 2007–2018 гг.

На Рис. 1.4 показаны примеры визуализаций ВКГ в координатах горизонтальная протяженность-высота, полученных с помощью сканирующего доплеровского лидара и сканирующего импульсного радара высокого разрешения. Пространственная структура в виде валов хорошо видна в поле радиальной скорости ветра в слое приземной инверсии (Рис. 1.4(а)); “кошачьи глаза” наблюдались в поле вертикального сдвига горизонтальной скорости ветра в приподнятом инверсионном слое (Рис. 1.4(б)). Такие пространственные изображения позволяют оценить горизонтальную протяжен-

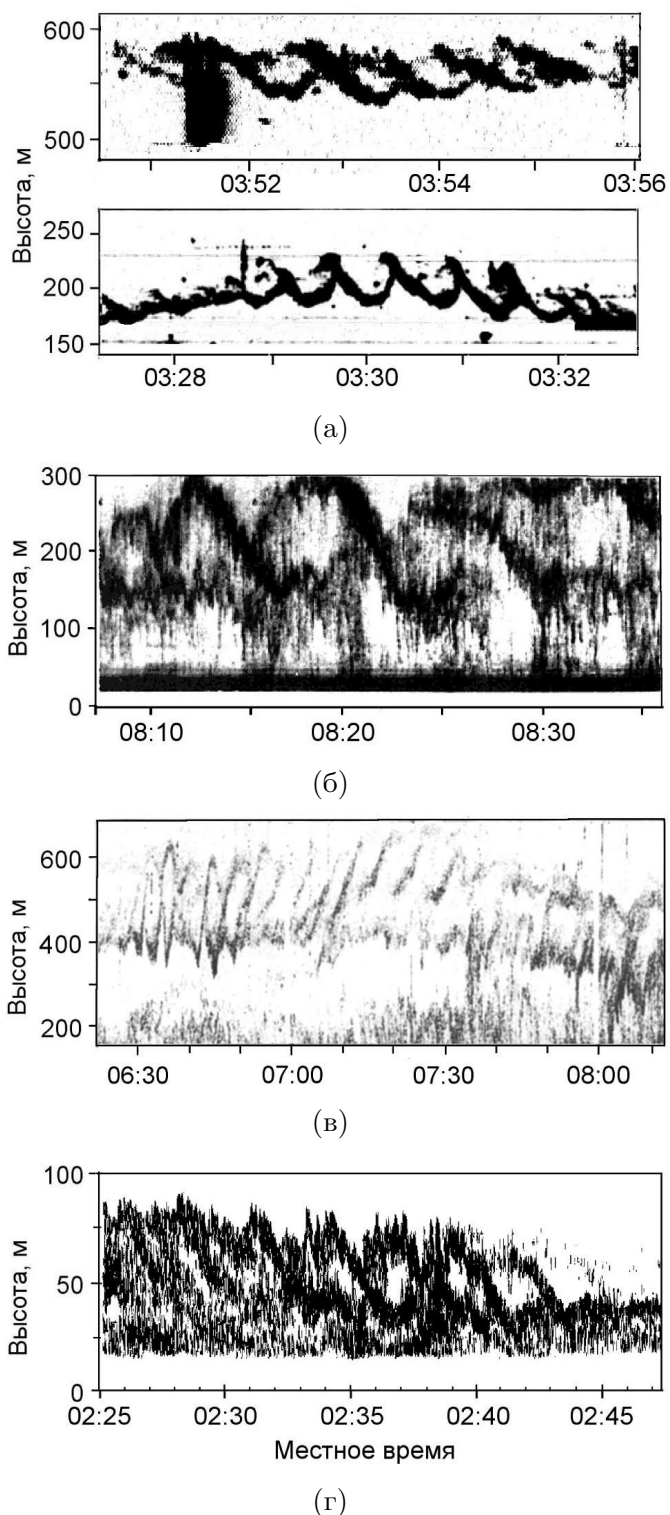


Рис. 1.3. Визуализация ВКГ на радарных и содарных эхограммах. а) - частотно-модулированный радар, Сан Диего; верх: 23 июня 1970 г.; низ: 25 июня 1970 г. б) - содар, Оклахома, 6 сентября 1971 г. в) - содар, Колорадо, 2 марта 1971 г. г) - содар, ЗНС ИФА РАН, 28 марта 1991 г. Адаптировано из [30; 51; 52; 60].

ность пакетов ВКГ и длину волны, не прибегая к гипотезе “замороженной” турбулентности Тейлора.

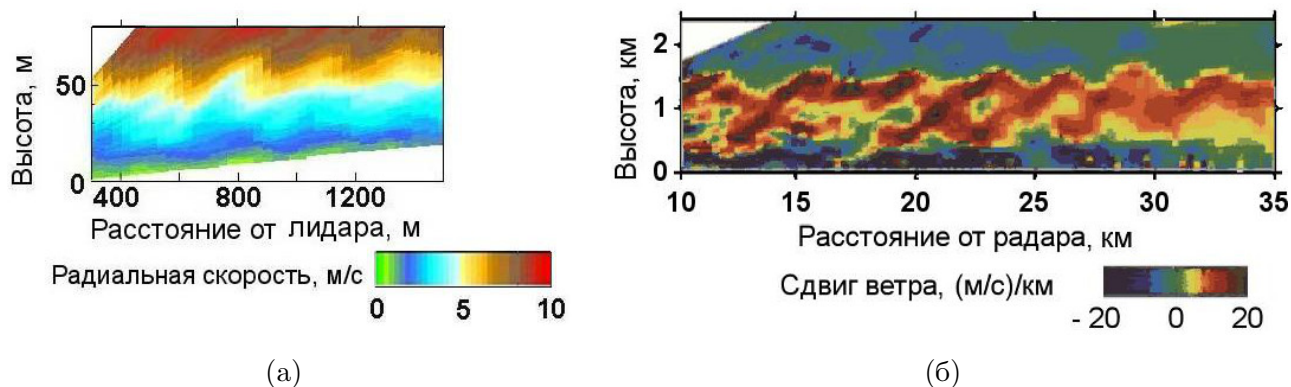


Рис. 1.4. Примеры визуализации ВКГ на эхограммах в координатах горизонтальная протяженность - высота, полученных с помощью (а) сканирующего доплеровского лидара [82] и (б) сканирующего импульсного радара высокого разрешения [28].

Из всех средств наземного дистанционного зондирования, пригодных для визуализации и исследования ВКГ в атмосферном пограничном слое, содар является самым простым и экономически эффективным прибором [29]. Современные высокочастотные минисодары с высоким пространственным разрешением (порядка 2 м) [89] позволяют детально исследовать волновые процессы в нижней части АПС.

1.3 Актуальные направления исследований ВКГ в атмосфере

Особое значение имеют исследования ВКГ в атмосферном пограничном слое, так как волны могут оказывать существенное влияние на тепло- и массообмен. Кроме того, исследования волн в АПС необходимы для решения многих прикладных задач, связанных с ближним переносом загрязнений и с ветроэнергетикой [см., например, 63]. В последнее десятилетие большое внимание уделяется вопросам взаимодействия волн в АПС с турбулентностью [см., например, 7; 14; 33; 70; 83; 91; 97; 98]. Это связано, прежде всего, с

развитием крупномасштабного регионального моделирования АПС, которое нуждается в адекватной параметризации обменных процессов при устойчивой стратификации [92]. У всех этих работ одна общая черта - детально исследуется по одному-два эпизода наблюдения пакетов ВКГ. В разных эпизодах наблюдаются разные параметры ВКГ, и сравнение производится с разными характеристиками АПС (в том числе с волновыми движениями флуктуаций температуры и скорости ветра), поэтому из этих исследований трудно составить общую картину взаимодействия. Было предложено несколько гипотез, объясняющих образование периодических валов в турбулентной структуре сдвиговых течений. Одно из объяснений - генерация турбулентности при разрушении волн Кельвина-Гельмгольца, образующихся вследствие сдвиговой неустойчивости, другим механизмом может выступать захват приземным волноводом бегущих волн от орографических препятствий. Также периодические структуры могут объясняться обрушением бегущих волн и последующей деформацией и переносом турбулентного следа сдвиговым потоком. Физические механизмы до сих пор не систематизированы и не установлено количественных связей параметров ВГВ с внешними параметрами. Более того, поскольку во многих из этих работ не используется визуализация волновых движений с помощью содаров, лидаров или радаров, то невозможно понять, какая форма ВКГ (валы, “кошачьи глаза”, “рыбьи кости”) наблюдалась, и вообще были ли это ВКГ или захваченные внутренние гравитационные волны, модулирующие высоту расположения границ инверсионных слоёв. В обзорах по данной тематике постоянно отмечаются трудности теоретических исследований устойчивого АПС, включая особую сложность исследования нелинейной проблемы взаимодействия волновой активности и турбулентности [1; 43; 54; 74].

Другим распространенным направлением экспериментальных исследований воздействия ВКГ на интенсивность турбулентности стоит развитие методов оценки взаимосвязи волн и турбулентности, практически важных для обеспечения безопасности воздушной навигации, но малоперспективных для выяснения физических процессов взаимодействия. Эти методы основаны на работах [65; 66], использующих опосредованную связь между синоптическими ситуациями, при которых велика вероятность возникновения ВКГ, и самолётными наблюдениями “турбулентности ясного неба”. В работах [38; 62] проанализирована синоптическая обстановка при многих авариях на коммерческих авиалиниях и использованы отчёты пилотов пассажирских самолетов о зонах сильной турбулентности. По оценкам, сделанным в работе [104] путём численного моделирования, линейные масштабы вторичных вихрей при обрушении ВКГ близки к типичным размерам пассажирских самолётов.

Основная часть недавних публикаций по проблеме ВКГ в атмосфере направлена на математическое моделирование атмосферных волн [см., например, 10; 42; 44; 46; 78; 80; 93—95; 103]. Одной из ключевых трудностей численного моделирования атмосферной циркуляции при исследованиях климата и численном прогнозе погоды является представление турбулентности устойчиво-стратифицированного пограничного слоя. При несомненной важности моделирования, отметим, что лишь в двух из вышеупомянутых работ проводится сравнение модельных расчетов с типовыми экспериментальными данными (т.е. не с результатами конкретного наблюдения), а в некоторых статьях [например, 80] даже прямо утверждается, что результаты прямого численного моделирования ВКГ значительно эффективней верифицировать с помощью моделей крупных вихрей (Large Eddy Simulation) в атмосфере, чем с помощью экспериментальных данных. В итоге, неко-

торые концепции, вытекающие из результатов численного моделирования, недостаточно подтверждены наблюдениями.

1.4 Выводы из Главы 1

К настоящему времени имеется много экспериментальных данных, показывающих повсеместное присутствие ВГВ, включая ВКГ, в устойчивом АПС. Современные средства наземного дистанционного зондирования - содары, радары и лидары - позволяют визуализировать волнообразные структуры в АПС и определять их пространственно-временные параметры и высотное расположение.

Подавляющее большинство работ по проблеме ВКГ в атмосфере, опубликованных за последние десятилетия, посвящено либо математическим аспектам теории внутренних гравитационных волн, либо численному анализу гипотетических моделей. Среди экспериментальных исследований ВКГ основное место занимают радиолокационные наблюдения волн в верхней тропосфере, нижней стратосфере и ионосфере в ходе регулярного зондирования, проводимого сетями радарного мониторинга. В атмосферном пограничном слое наблюдений ВКГ немного, что, по-видимому, объясняется отсутствием сетевого мониторинга АПС и эпизодичностью дистанционного зондирования этого слоя.

В то же время, исследования ВГВ весьма важны именно в атмосферном пограничном слое, так как волны могут оказывать существенное влияние на обменные процессы. Исследования ВГВ в атмосфере необходимы для понимания и параметризации атмосферной циркуляции в численных региональных моделях, а также для решения многих прикладных задач.

ГЛАВА 2

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ВОЛН

Во второй главе описана аппаратура и методика измерений и обработки данных. В качестве основного инструмента в исследованиях использовались доплеровские акустические моностатические локаторы (содары). В главе приводится краткая история развития методов акустического зондирования, описываются физические основы действия содаров, рассматриваются вопросы интерпретации эхограмм и основные количественные соотношения. Приводится описание используемой аппаратуры, ключевые особенности используемой схемы измерений и обработки данных. В главе приведены примеры эхограмм с визуализацией внутренних гравитационных волн (ВГВ) различных типов и описана методика регистрации волн Кельвина-Гельмгольца (ВКГ). Кроме того, представлены описания стационарных измерительных пунктов сети содарного мониторинга в Московской области, а также экспедиционных пунктов содарных измерений, проводившихся в Антарктике, в степных, аридных и прибрежных регионах.

2.1 Метод акустического зондирования атмосферы

Метод акустического зондирования атмосферы основан на эффекте рассеяния звука мелкомасштабными турбулентными неоднородностями температуры и скорости ветра. Устройство акустического зондирования – «содар» (английская аббревиатура SODAR – SOnic Detection And Ranging) - излучает в атмосферу короткий звуковой импульс и затем принимает рассеянный на различных высотах сигнал. Интенсивность принятого сигнала пропорциональна интенсивности турбулентности, а доплеровский сдвиг его частоты

равен лучевой компоненте скорости перемещения рассеивающих неоднородностей, т. е. скорости ветра. Зондирование в трёх различных направлениях позволяет получить вертикальные профили скорости и направления ветра. Методом акустического зондирования, благодаря его высокой разрешающей способности, можно дистанционно измерять метеорологические параметры и характеристики турбулентности нижней части АПС до высот нескольких сотен метров, недоступных стандартным метеорологическим мачтам.

Вследствие сильного поглощения слышимого звука в воздухе, содары обладают небольшим высотным диапазоном зондирования (от 10–20 м до 150–800 м над подстилающей поверхностью) и не могут измерять скорость ветра во всем пограничном слое, который при неустойчивой стратификации простирается до высоты 1,5–2,0 км [8]. Однако, в инверсионных условиях (при которых толщина слоя перемешивания не превышает нескольких сот метров) хорошее пространственное разрешение и малая «мертвая зона» содаров дают акустическому зондированию преимущества перед другими средствами наземного дистанционного зондирования АПС [29]. Кроме того, содары значительно проще и экономически доступнее, чем радары ясного неба и доплеровские лидары. Поэтому при исследовании низкоуровневых струйных течений и волн в АПС содары являются наиболее адекватным средством дистанционных измерений.

Достоинством содаров, помимо количественных измерений, является их способность визуализировать мезомасштабную структуру турбулентности. По виду содарных эхограмм можно определить тип термической стратификации, найти высоту расположения и вертикальные размеры турбулизированных слоёв, обнаружить волновые явления. Несмотря на простоту метода, акустическое зондирование является мощным источником экспериментальных данных при решении многих теоретических фундаментальных и прак-

тических задач, связанных с атмосферным пограничным слоем: изучение динамических атмосферных процессов, совершенствование региональных численных прогнозов погоды, прогнозирование качества воздуха в нижней тропосфере и мониторинг ближнего переноса примесей, оценки эффективности ветроэнергетики и рисков воздухоплавания, повышение надежности воздушных коммуникационных и навигационных линий связи.

Особый интерес акустическое зондирование представляет для исследований волновых процессов в АПС. Гравитационные волны, сдвиговые волны, захваченные волны - все эти феномены представляют собой удивительной красоты явления, играют большую роль в динамических и обменных процессах. Простота и надежность конструкции содара, нетребовательная к условиям и подстройке, позволяет проводить круглогодичный мониторинг параметров пограничного слоя в непрерывном режиме. А содарные эхограммы позволяют напрямую визуализировать волновые явления в двумерном высотно-временном поле. Такое представление существенно облегчает феноменологический анализ и разработку моделей явления, а диапазон зондирования и данные о турбулентной структуре и профилях ветра делают акустическое зондирование незаменимым инструментом в некоторых приложениях.

2.1.1 Физические основы метода акустического зондирования атмосферы

В основе методов акустического зондирования атмосферы лежит явление рассеяния звука на неоднородностях показателя преломления. Была получена [18] следующая формула эффективного сечения рассеяния звука в атмосфере (σ):

$$\sigma_\theta = 2\pi k^4 \cos^2 \theta \{ \Phi_T(K)(2T)^{-2} + \cos^2(\theta/2)\Phi_v(K)c^{-2} \}, \quad (2.1)$$

где

$$\Phi_T(K) = 0,033C_T^2 K^{-11/3}, \Phi_v(K) = 0,061C_v^2 K^{-11/3} \quad (2.2)$$

- это Колмогоровские спектры флуктуаций температуры и скорости ветра для локально однородной и изотропной турбулентности. Структурные характеристики температуры и скорости ветра:

$$C_T^2 = \langle (T_1 - T_2)^2 \rangle r_{1,2}^{-2/3}, C_v^2 = \langle (v_1 - v_2)^2 \rangle r_{1,2}^{-2/3}, \quad (2.3)$$

(“закон 2/3” Колмогорова-Обухова), T — средняя температура воздуха, c — средняя скорость звука, $r_{1,2}$ — расстояние между точками измерения температуры T_1 и T_2 , $k = 2\pi/\lambda$, $K = 2k \sin(\theta/2) = 2\pi/l_t$ - волновое число турбулентности линейного масштаба l_t [59]. Общий вид теоретических индикатрис рассеяния представлен на Рис. 2.1.

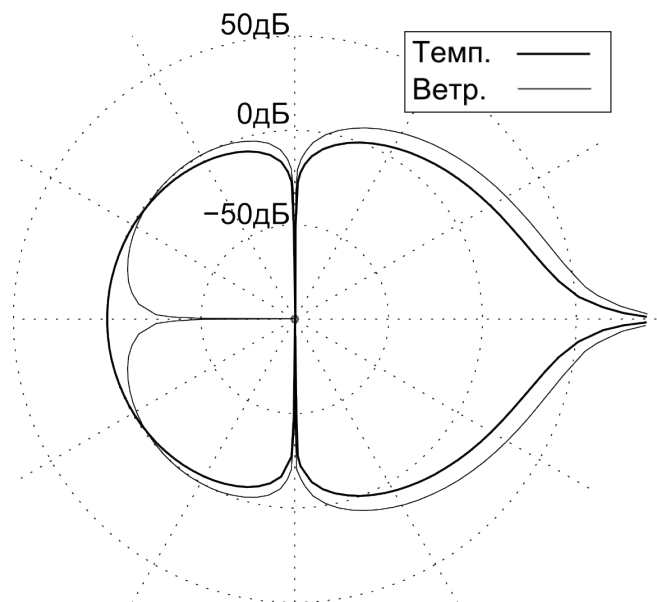


Рис. 2.1. Общий вид теоретических индикатрис рассеяния на температурных и ветровых флуктуациях.

Из формулы видно, что при угле рассеяния 90 градусов рассеяние отсутствует, а при 180 градусах вклад дают только флуктуации температуры.

При углах рассеяния, при которых множитель $\cos^2(\theta/2)$ близок к единице, вклад температурных флуктуаций в интенсивность рассеянного сигнала обычно на 1–2 порядка величины меньше вклада ветровых флуктуаций. Для обратного рассеяния (рассеяния на угол 180 градусов), используемого в моностатическом содаре, эффективное сечение определяется первым членом в выражении 2.1:

$$\sigma_{180} = 2\pi k^4 \Phi_T(K) (2T)^{-2}, \quad (2.4)$$

$K = 2k$ – значение K для обратного рассеяния.

Из выражений 2.4 и 2.2 следует:

$$\sigma_{180} = 3,9 \cdot 10^{-3} k^{1/3} C_T^2 T^{-2} = 7,5 \cdot 10^{-3} \lambda^{-1/3} C_T^2 T^{-2}, \quad (2.5)$$

$$C_T^2 = 140 \sigma_{180} \lambda^{1/3} T^2. \quad (2.6)$$

Формулы 2.5 и 2.6 корректны при условии, что характеристический масштаб рассеивающих неоднородностей, $l_t = \lambda/2$, находится в “инерционном интервале турбулентности”, где применима гипотеза однородной и изотропной турбулентности. Как видно из схемы Колмогоровского спектра, приведенной на Рис. 2.2, данное условия выполняется для содаров с опорными частотами 1,5–6,0 кГц, что соответствует $\lambda/2 = 2 \div 10$ см.

Значение обратного рассеяния выражается через отношение излучаемой и принимаемой акустической мощности P_t и P_r для моностатического содара следующей формулой:

$$\sigma_{180} = P_r R^2 \exp(2\alpha R) [P_t (c\tau/2) S_{ant}]^{-1}, \quad (2.7)$$

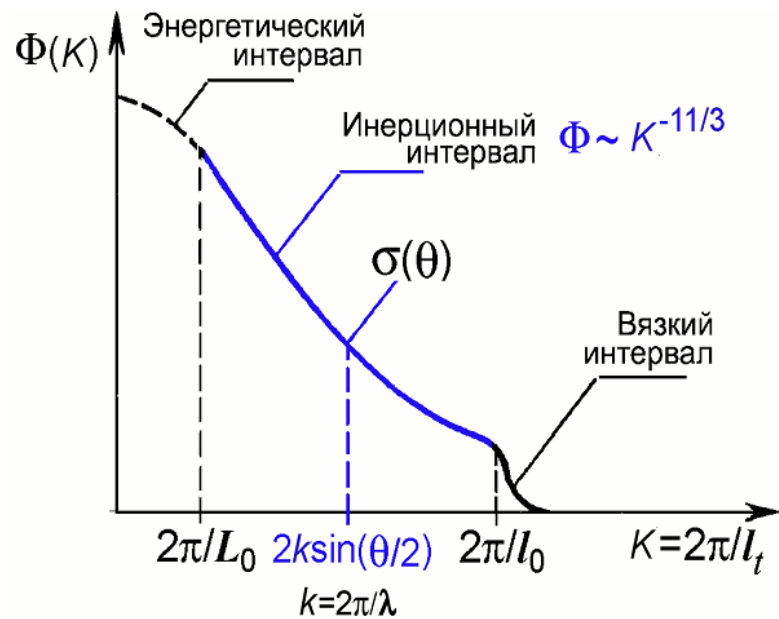


Рис. 2.2. Колмогоровский спектр температурных флуктуаций.

где R — расстояние между акустической антенной и рассеивающим объемом, α — коэффициент поглощения звука в воздухе, $c\tau/2$ — толщина рассеивающего объема (c — скорость звука, τ — длительность акустического импульса), S_{ant} — эффективная площадь антенны. Коэффициент затухания α определяется механизмом молекулярного поглощения звука в воздухе и зависит от температуры воздуха, влажности, давления и частоты звукового сигнала. Для эхосигнала моностатического содара с опорной частотой 2 кГц можно дать следующие оценки величин, входящих в выражение 2.7 (при температуре воздуха $T = 273$ К, относительной влажности $h_r = 70\%$ и давлении $p = 1013$ мБар, и при типичных величинах $C_T^2 = 10^{-2} \div 10^{-4}$ $\text{К}^2\text{м}^{-2/3}$ для слоя зондирования на высоте 100 м) [61]:

$$\sigma = 10^{-8} \div 10^{-10} \text{ м}^{-1};$$

$$P_t = 10 \text{ Вт};$$

$$\alpha = 1,4 \text{ дБ}/100 \text{ м};$$

$$\tau = 0,1 \text{ с};$$

$$P_r = 10^{-11} \div 10^{-13} \text{ Вт}.$$

Рассеивающие неоднородности переносятся ветром (согласно гипотезе замороженной турбулентности), поэтому частота отраженного сигнала f оказывается сдвинутой относительно частоты зондирующего импульса f_0 вследствие эффекта Доплера. Компонента скорости ветра, параллельная направлению зондирования, таким образом выражается следующей формулой:

$$V_r = \frac{c}{2f_0}(f_0 - f). \quad (2.8)$$

2.1.2 Практическая реализация метода акустического зондирования

Предшественниками современных методов акустического зондирования можно считать эксперименты Джона Тиндаля по изучению распространения звука в атмосфере над морем с использованием аппарата, приведенного на Рис. 2.3. Тиндаль зафиксировал акустическое отражение от температурных и ветровых структур, которые он назвал “акустическими облаками”. Однако более 70 лет потребовалось для рождения идеи о том, что подобные эффекты можно использовать для зондирования параметров атмосферы.

Термин “содар” (“звуковой локатор”) впервые появился в 1946 году в работе [49], где были опубликованы данные об “отражении” звука от ясного неба. Позже МакАллистер усовершенствовал конструкцию содара, применив факсимильный аппарат для записи акустического эхосигнала, что позволило визуализировать турбулентную структуру АПС до высоты 1 км [75]. Таким методом удалось получить четкие изображения инверсий, конвективных струй и даже явную картину внутренних гравитационных волн. На Рис. 3.2 приведена факсимильная запись принятого сигнала на содаре

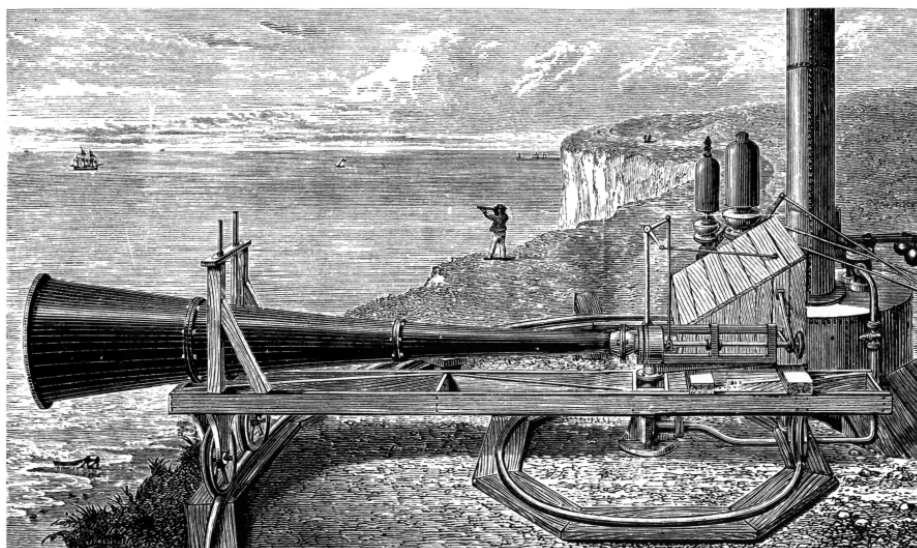


Рис. 2.3. Звуковая сирена Тиндаля, использованная в экспериментах по изучению распространения звука над морской поверхностью [102].

МакАллистера, на которой четко видны “перья” восходящих конвективных потоков.

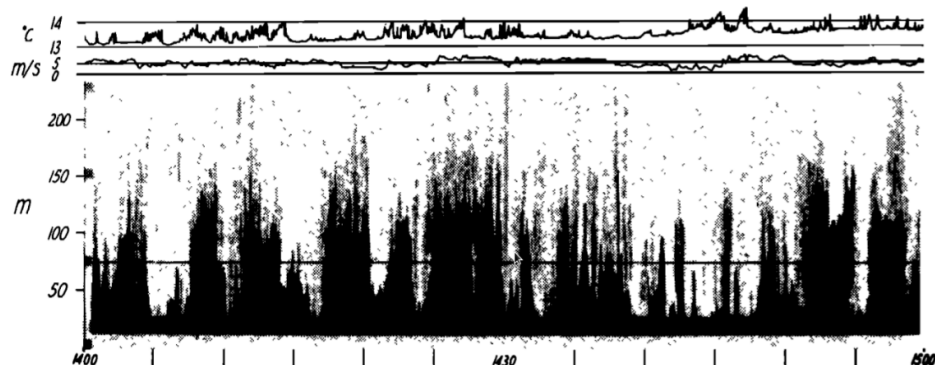


Рис. 2.4. Изображение термических потоков, полученное МакАллистером на факсимильной записи принятого эхосигнала [75].

Для развития методики акустического зондирования было необходимо понимание процесса рассеяния акустических волн в турбулентной атмосфере. Основные положения теории рассеяния звука на турбулентности были впервые сформулированы А.М. Обуховым [13]. В его работе было приведено решение волнового уравнения, содержащего случайные параметры, введено понятие тензора случайного поля скоростей. Было показано, что рассеяние происходит по принципу дифракции Брэгга, и получено локальное уравнение рассеяния.

Асимптотические формулы для индикатрисы рассеяния звука в турбулентной атмосфере были получены в работе В.И. Татарского в 1967 году [18]. Считая турбулентность локально изотропной и локально однородной, он использовал Колмогоровский спектр для представления спектральных плотностей турбулентных пульсаций через структурные характеристики, что позволило ему получить выражение для индикатрисы рассеяния, пригодное для практических расчетов и проведения сравнения с экспериментальными данными.

В 1969 году системный анализ методики акустического зондирования был проведен Литтлом [72], который обобщил теорию Обухова-Татарского и экспериментальные данные М.А. Каллистратовой [4] с практическим опытом зондирования АПС МакАллистером. После этого началась активная разработка методов акустического зондирования атмосферы. Первые коммерческие образцы содаров появились уже в 70-х годах, и позже, в США и Европе, началось их широкое производство.

В ИФА было разработано несколько поколений исследовательских содаров, проведена верификация количественных содарных измерений путем сопоставления с измерениями на мачте и самолете, выполнен большой комплекс содарных исследований АПС. Обзоры этих работ содержатся в [5; 6; 58].

2.2 Технология содарного зондирования для исследования ВКГ

2.2.1 Базовая конструкция содара

Упрощенная блок-схема моностатического звукового локатора (содара) с использованием программных ресурсов компьютера изображена на Рис. 2.5. В такой схеме аудио импульс, сгенерированный звуковой картой компьютера, усиливается и направляется через переключающее устройство на реверсивный электроакустический преобразователь. После излучения импульса преобразователь переключается в режим приема и передает принятый эхо-сигнал через усилитель на звуковую карту.

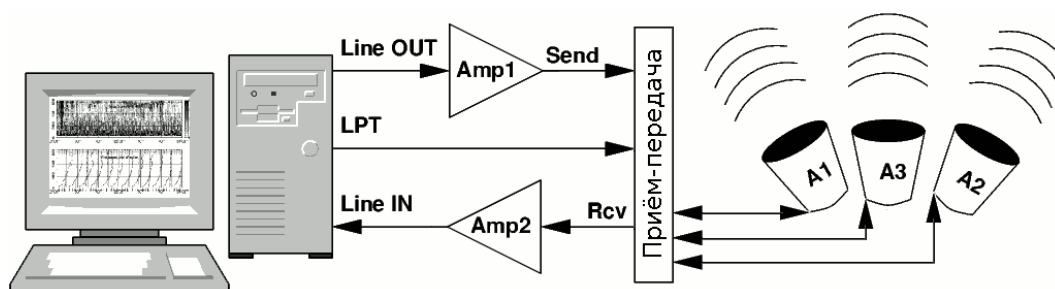


Рис. 2.5. Блок-схема трехкомпонентного моностатического содара ИФА им. А.М. Обухова на базе компьютерных технологий [9].

Звук, рассеянный на различных высотах, приходит с соответствующими задержками, что позволяет определить профили эффективности рассеяния и лучевой компоненты скорости ветра. Цикл зондирования содара в координатах высота-время представлен на Рис. 2.6(а). Антенна излучает зондирующий сигнал частоты f в течение интервала времени τ . Сигнал распространяется вверх со скоростью звука c , и небольшая часть его рассеивается в атмосфере в обратном направлении. После этого в момент времени $t_1 = 2h_1/c$ принимается сигнал, рассеянный в высотном диапазоне h_1 (высота

от $ct_1/2$ до $c(t_1 + \tau)/2$), в момент t_2 – в диапазоне h_2 и т.д. Вертикальное разрешение содара определяется пространственной протяженностью импульса $\Delta z = c\tau$. Особенностью моностатических содаров является наличие “мертвой зоны”: данные для нижнего высотного уровня недоступны, так как прием сигнала возможен только через некоторое время после излучения импульса из-за переходных процессов в антенне.

В измерениях 2006–2018 гг. также использовались содары с частотно кодированным зондирующим импульсом. В этом режиме содар излучает последовательно n (например, $n = 3$) зондирующих импульсов длительностью τ на дискретно возрастающих частотах, и эхо-сигнал принимается на этих частотах одновременно (Рис. 2.6(б)). Такой режим увеличивает время зондирующего цикла на $(n - 1)\tau$ по сравнению с одночастотным режимом, однако дает возможность получить n независимых эхо-сигналов с более высоких уровней, где сигнал слабее. В любой момент времени принятый сигнал приходит со всех высот, через которые проходит путь импульсов. Поскольку запись эхо-сигнала начинается непосредственно после излучения последнего импульса, то с нижних высот можно принять эхо-сигнал только от импульсов, излучаемых последними. В момент времени t_1 антенна принимает эхо-сигнал с высотных диапазонов h_1, h_2, h_3 на частотах f_1, f_2, f_3 соответственно. В момент t_2 – с высот h_2, h_3, h_4 и так далее. Таким образом, принимается один отраженный сигнал с диапазона h_1 , два с h_2 и все три с более высоких диапазонов.

Для формирования звукового луча в содарах ИФА используются параболические отражающие антенны, ширина луча определяется соотношением длины волны зондирующего импульса и диаметром антенны. При малых τ ($\sim 0,1$ с) по сравнению с характерными временами для зондируемого объема, принятые эхо-сигналы из одного высотного диапазона можно считать

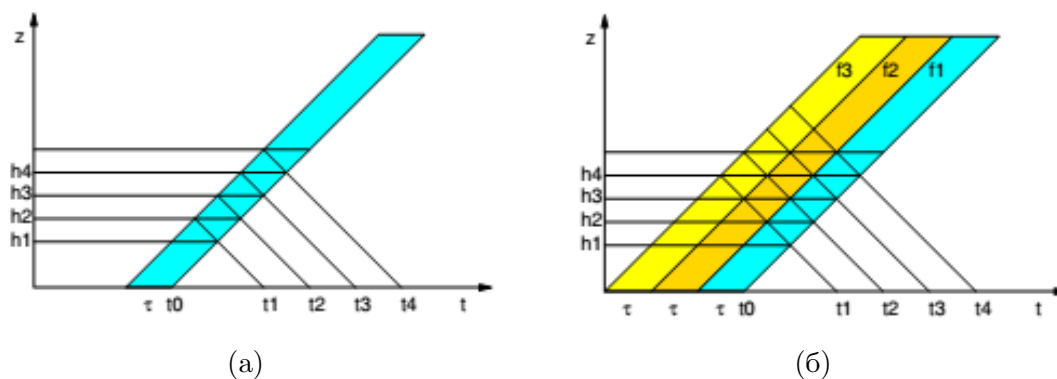


Рис. 2.6. Схема цикла зондирования содара в координатах высота-время: излучение звукового импульса длительностью τ и прием эхо-сигнала. а) - одночастотное зондирование; б) - частотно-кодированное зондирование [67].

независимыми измерениями для одного и того же объема в один момент времени. Многочастотные измерения не улучшают соотношение сигнал-шум, однако позволяют определять уровень сигнала с большей точностью, что увеличивает статистическую обеспеченность сигнала при сохранении разрешающей способности по времени. Благодаря этому может быть выбран более мягкий критерий отбраковки данных по уровню сигнал-шум, высотный диапазон зондирования при этом увеличивается. Главным преимуществом частотного кодирования применительно к задачам данного исследования является значительное улучшение различимости турбулентной структуры АПС на эхограммах, особенно в области слабой интенсивности сигнала.

Для измерения вертикального профиля ветра зондирование производят в трех различных направлениях, и по трем радиальным компонентам ветра восстанавливают профили скорости и направления горизонтального ветра, а также вертикальной компоненты ветра. Для достижения наибольшей точности измерений одна антенна направляется в зенит, а две других наклоняют на угол 20–30 градусов от зенита с азимутами, различающимися на 90 градусов.

2.2.2 Принципы обработки эхосигнала

Существует два основных подхода к обработке сигнала. Первый из них основан на осреднении спектров, полученных для каждого высотного диапазона по серии измерений. Этот метод подходит для получения усреднённых характеристик АПС, и позволяет добиться большей высоты зондирования, но практически непригоден для исследования процессов с характерными временами в несколько минут. В содаре ЛАТАН-3 реализован другой подход. Используемый алгоритм осуществляет анализ эхо-сигнала от каждого зондирующего импульса в отдельности. Это позволяет получать данные с максимальным разрешением по времени (“мгновенные” профили параметров). В результате обработки, для каждого высотного интервала определяются три величины: интенсивность сигнала с шумом, центральная частота сигнала и интенсивность шума. Принцип обработки принятого сигнала является общим для одночастотного и частотно-кодированного режима.

При обработке оцифрованный сигнал делится на части в соответствии с высотными интервалами, и интервалы обрабатываются последовательно начиная с нижнего. Для интервала рассчитывается спектр мощности методом быстрого преобразования Фурье. Максимум на спектре определяется в два шага. Сначала ищется центр масс спектра в широкой полосе (ширина полосы выбирается в соответствии с предполагаемыми ветровыми условиями) вокруг рабочей частоты, а затем в узкой вокруг найденной. За центральную частоту эхо-сигнала принимается центр масс узкой полосы, а за интенсивность – средняя спектральная плотность мощности в полосе частот вокруг центральной частоты, по ширине равной ширине спектра зондирующего импульса. Полученное таким образом значение является оценкой общей интенсивности сигнала и шума. Уровень шума измеряется по мощности в

двух полосах в два раза больше ширины, прилегающих к полосе сигнала. В случае, если отношение сигнала к шуму является “хорошим” (т.е. $S/N > 4$ дБ для одночастотного режима и $S/N > 2$ дБ для частотно-кодированного), найденная центральная частота используется в качестве середины “зоны поиска” на следующем высотном диапазоне для наклонных антенн. При обработке сигнала частотно-кодированного содара аналогичный алгоритм применяется для обработки комбинированного спектра, который вычисляется на основе осреднения всех индивидуальных спектров для каждого интервала высот.

В результате обработки сигнала в выходные данные содара для каждого высотного интервала записываются значения доплеровской радиальной скорости V_R и интенсивностей сигнал+шум S и шум N . В процессе обработки выбирается максимум спектра в качестве сигнала, поэтому значение S оказывается в среднем несколько выше, чем N , даже в отсутствие эхосигнала в принимаемом звуке. Систематическое завышение S зависит от статистической устойчивости мгновенной оценки спектра. Таким образом, необходимо введение некоторого положительного порогового значения S/N для оценки степени достоверности и в качестве критерия для отбраковки значений (порядка 3 дБ).

Для достижения максимального временного разрешения в содаре не применяется осреднение сигналов или спектров по нескольким импульсам зондирования. Осредненные данные могут быть получены путем автономной обработки исходных данных.

Содар предоставляет большой объем информации, и существенной является проблема её обработки и интерпретации. Первичные данные измерений - в виде цифровых аудиозаписей принятого эхосигнала для каждого цикла зондирования - используются, в основном, для отладки содара и определе-

ния вида помех в сигнале. Данные предварительной обработки сигналов - мгновенные профили интенсивности сигнала, шума и радиальной скорости каждого цикла зондирования - сохраняются в виде текстовых таблиц.

Значительно упрощает первичный анализ данных их автоматизированная визуализация. Сонарные эхограммы и профили скорости и направления ветра, которые доступны для всего временного интервала зондирования, позволяют определить тип стратификации АПС, определить структуру и положение инверсионных слоев, струйных течений, волновых движений и т.п. Пример визуального представления данных зондирования приведен на Рис. 2.7. Изображение содержит 6-часовую эхограмму интенсивности сигнала, векторы вертикальной скорости (красным цветом - восходящие потоки, зеленым - нисходящие) и серию профилей скорости и направления ветра (все профили представлены в осреднении за 30 минут). Профили скорости показаны линиями с точками, линии без точек - данные о скорости, имеющие малое статистическое обеспечение (более 25% данных за 30 минут имеют соотношение сигнал/шум менее 3 дБ).

2.2.3 Идентификация внутренних волн в АПС на сонарных эхограммах

В условиях устойчивой стратификации АПС на сонарных эхограммах интенсивности принятого сигнала регулярно наблюдаются периодические и квазипериодические структуры, с временными периодами от десятков секунд до нескольких минут и с вертикальными масштабами от десятков до сотен метров. Структуры отличаются широким разнообразием форм и условий возникновения. Из всего многообразия можно выделить несколько

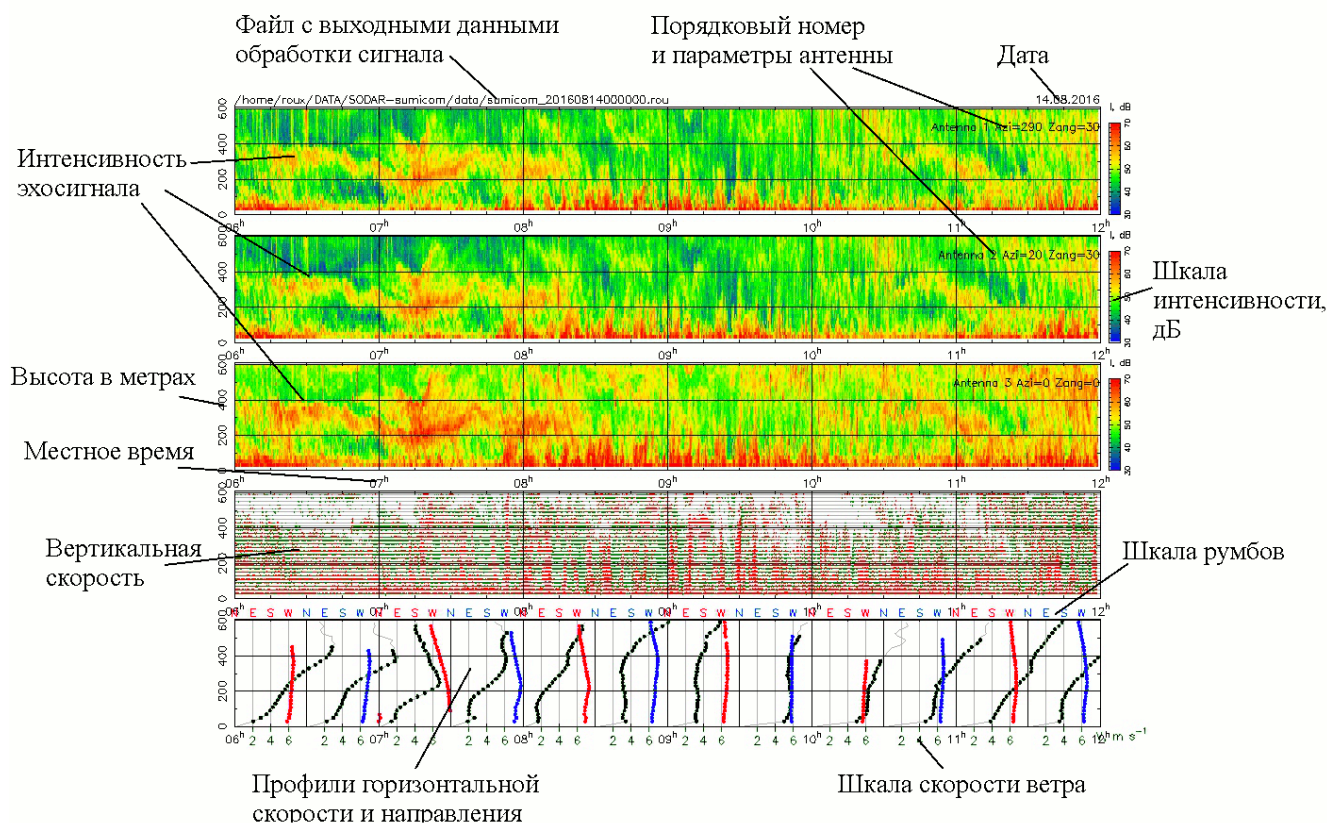


Рис. 2.7. Пример визуализации содарных данных, Цимлянская научная станция ИФА, 14.08.2016.

основных типов поперечных внутренних волн, которые достаточно регулярно идентифицируются на содарных эхограммах:

- 1) внутренние гравитационные волны (ВГВ) типа волн плавучести (ВП) наблюдаются в форме синусоидальных колебаний высоты инверсионных слоёв, а также в поле вертикальной скорости. Скорость и направление распространения ВП отличается от скорости ветра в слое. Источником ВП может являться бароклинность тропосферы или орographic препятствие на пути воздушного потока. В равнинной местности средних широт ВП на эхограммах содаров наблюдаются редко, порядка десяти эпизодов за год, обычно при прохождении грозовых фронтов (Рис. 2.8(a));
- 2) обрушающиеся волны Кельвина-Гельмгольца в виде непродолжительных цугов формы “кошачьи глаза”, сопровождающихся интенсивным

перемешиванием волнового слоя, увеличением вертикальных потоков тепла и массы, и интенсивности турбулентности. Обязательным условием их возникновения является наличие сдвиговой неустойчивости в слое. Волны такого типа в равнинной местности регистрируются чрезвычайно редко, не более нескольких эпизодов в течение года (Рис. 2.8(б));

- 3) внутренние гравитационно-сдвиговые волны типа волн Кельвина-Гельмгольца (ВКГ) в форме наклонных полос в поле C_T^2 , занимающих весь турбулизованный слой инверсии, наблюдаются регулярно при наличии сдвига ветра. Такие пакеты ВКГ распространяются со скоростью потока и могут существовать от десятков минут до нескольких дней. В равнинной местности такие структуры наблюдаются в 80% случаев наличия приземной или приподнятой инверсии (Рис. 2.8(в)).

ВКГ в форме наклонных полос или “гребней” являются наиболее распространенным видом внутренних гравитационных волн, регулярно наблюдаемым в устойчиво-стратифицированном АПС. Поэтому в данной работе основное внимание уделяется исследованию именно такого типа волн.

При анализе архивных данных была проведена модернизация программ автоматической обработки первичных сигналов содара, специально направленная на исследования ВКГ, которая позволила увеличить контрастность и временной масштаб эхограмм. В результате, количество обнаруженных эпизодов ВКГ (более 300 эпизодов за год) резко увеличилось по сравнению с указанным в работе [12] количеством (около 200 эпизодов за 3 года), которое было получено при использовании стандартных программ для многофункциональных содарных исследований. На Рис. 2.9 приведен фрагмент содарного изображения структуры АПС над центром Москвы на стандартной эхограмме и на эхограмме с повышенной контрастностью и разрешением. На

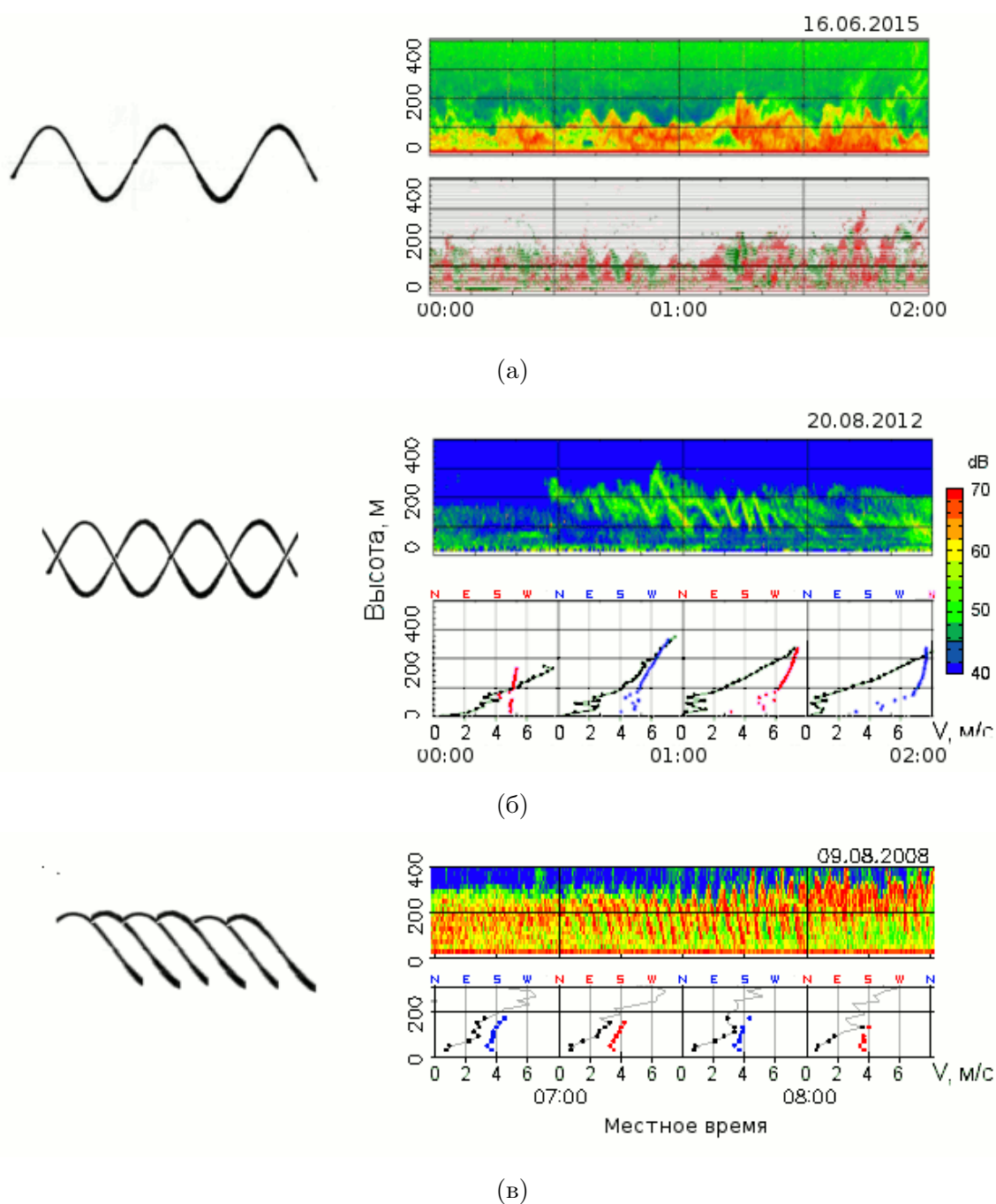


Рис. 2.8. Типы волновых структур, регистрируемых содаром. Слева — схематическое изображение структуры на эхограмме, справа — примеры содарных данных. а) ВГВ типа волн плавучести; на нижней панели - поле вертикальной скорости. Черноморский гидрофизический полигон РАН, 2015 г. б) обрушающиеся ВКГ в форме “кошачьих глаз”; на нижней панели профили скорости и направления ветра. ЦНС, 2012 г. в) ВКГ в виде “гребней”. ЗНС, 2008 г.

второй эхограмме достаточно четко видны квазипериодические колебания интенсивности эхо-сигнала, которые оставались незамеченными на первой эхограмме.

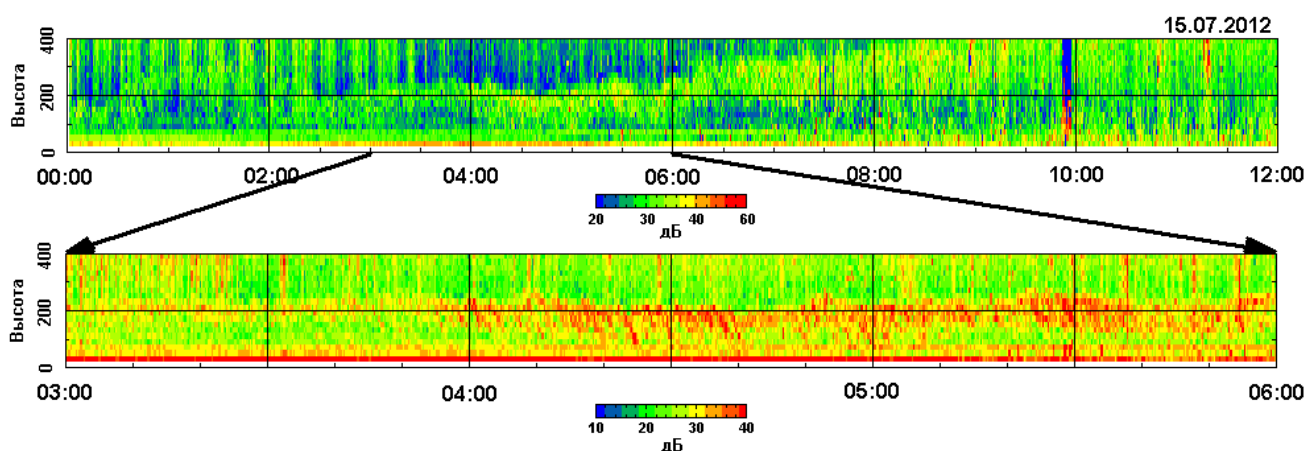


Рис. 2.9. Модернизация программ обработки содарных данных для исследования ВКГ. Вверху - стандартная эхограмма для ночи 16 июля 2012 года, на которой не видно волн. Внизу - эхограмма для той же ночи, но с повышенным разрешением и контрастностью, визуализирующая колебания интенсивности эхо-сигнала. Под эхограммами указано местное время и даны цветовые шкалы относительной интенсивности эхо-сигнала в децибелах.

2.3 Описание используемой аппаратуры и измерительных пунктов

2.3.1 Содары

В измерениях использовались модификации содаров ЛАТАН-3 и ЛАТАН-3м (многочастотный), разработанные в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН [9; 67]. Модульный принцип конструкции содара позволяет использовать разные типа излучателей и антенн с общим электронным блоком, а компьютерная генерация и обработка импульсов позволяет быстро менять параметры зондирования. Эти особенности делают ЛАТАН-3 легко адаптируемым инструментом и позволяют оперативно настраивать прибор

под конкретные исследовательские задачи и текущие метеорологические условия. В Таблице 2.1 приведен перечень основных модификаций и режимов работы содара ЛАТАН-3.

В базовом режиме работы трёхкомпонентный содар использует диапазон несущей частоты 1,6–2,0 кГц (длины волн 0,20–0,16 м), и имеет высотное разрешение 20 м, разрешение по времени 15 с и высотный диапазон от 30 м до 650 м. Этот содар позволяет регистрировать волновые структуры с амплитудами более 100 м и периодами более 5 минут. Минисодар работает на несущей частоте 3,5–5,0 кГц (длины волн 0,09–0,07 м), имеет высотное разрешение 5–10 м, разрешение по времени 3–5 с и высотный диапазон от 10 до 250 м. Основные параметры содара и минисодара приведены в Таблице 2.2. На Рис. 2.10 приведена фотография содара и минисодара.



Рис. 2.10. Содар и минисодар в песках Калмыкии в процессе сборки. 2016 г.

Относительно небольшое улучшение разрешающей способности минисодара по сравнению с содаром приводит к более чем десятикратному увеличению количества зарегистрированных эпизодов волновой активности. Однако меньший диаметр антенны и меньший размер шумозащитной шахты делают минисодар более чувствительным к внешнему акустическому шуму. В ходе исследований ВКГ минисодары применялись только в экспедици-

Таблица 2.1. Перечень основных модификаций содара ЛАТАН-3 для исследования ВКГ.

Параметр	Модификации	
Диаметр отражателя	1,2 м (содар)	0,6 м (минисодар)
Количество антенн	1	3
Опрос антенн	синхронный	последовательный
Импульс	одночастотный	частотно-кодированный

Таблица 2.2. Системные параметры содара ЛАТАН-3 в различных модификациях.

Параметр	Содар	Минисодар
Рабочая частота	2 кГц	4 кГц
Высотный диапазон	20 ÷ 700 м	5 ÷ 350 м
Разрешение по высоте	20 м	5 ÷ 10 м
Разрешение по времени	20 с	3 ÷ 5 с
Диапазон измеряемых значений скорости	±20 м/с	
Точность измерения скорости	±0,3 м/с	

онных условиях для зондирования АПС в местах, удаленных от городской застройки.

2.3.2 Измерительные пункты

Измерения исследуемых величин регулярно проводились на стационарных пунктах дистанционного зондирования в г. Москве и на Звенигородской научной станции (ЗНС ИФА РАН) в Московской области, а также в режиме экспедиционных работ на Цимлянской научной станции (ЦНС ИФА РАН) и в составе комплексных экспедиций ИФА РАН в других регионах.

Многолетние данные были получены на базе экспериментальной мезомасштабной сети мониторинга атмосферного пограничного слоя в Московском регионе, состоящей из трёх стационарных пунктов наземного дистанционного зондирования АПС. Подробнее организация содарной сети разобрана в Главе 3.

Данные о структуре атмосферного пограничного слоя при долговременных инверсиях над снежной и ледовой поверхностью, сопровождаемых низкоуровневыми струйными течениями (НСТ) и кatabатическими ветрами, были получены в ходе антарктических экспедиций: на французско-итальянской станции “Конкордия” на плато С и на финской станции “Абоа” на слабо-наклонной однородной поверхности ледника.

В серии экспедиционных экспериментов ИФА РАН были проведены исследования поля ветра, структуры турбулентности и волновых процессов над различными типами местности:

- над однородной степной поверхностью — на Цимлянской научной станции ИФА в 2012–2017 гг. в летний период в ходе непрерывных измерений длительностью от двух до четырех недель;
- над однородной песчаной поверхностью в аридной зоне — на песчаных дюнах вблизи пос. Нарын-Худук, Калмыкия, в 2016 году в летний период в ходе десятидневного круглосуточного мониторинга параметров АПС;
- над морем в прибрежной зоне и на береговых склонах - на Черноморском гидрофизическом полигоне РАН с использованием стационарной океанологической платформы летом 2015 и осенью 2016 года в ходе десятидневных круглосуточных измерений.

Фотографии содаров в процессе экспедиционных измерений представлены на Рис. 2.11.



(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 2.11. Содарные измерения в экспедиционных условиях. а) Содар в степи на Цимлянской научной станции (ЦНС), 2016 г. б) Одноантенный содар на песчаной дюне, пос. Нарын-Худук, Калмыкия, 2016 г. в) Минисодар на океанологической платформе, Черноморский гидрофизический полигон, 2015 г. г) Минисодар на ЦНС, 2015 г.

2.4 Выводы из Главы 2

Содары позволяют проводить непрерывные измерения вертикальных профилей структурной характеристики температуры C_T^2 , а также скорости и направления ветра с высоким пространственным и временным разрешением. При исследовании волновой активности главным достоинством содаров (как и других локационных средств зондирования) является их способность визуализировать мезомасштабную структуру АПС, что позво-

ляет по форме эхограмм отличать волны Кельвина-Гельмгольца от бегущих волн плавучести, а также определять высоту расположения волновых слоев и их вертикальную протяженность. В инверсионных условиях хорошее пространственное разрешение и малая “мертвая зона” содаров дают акустическому зондированию преимущества перед другими средствами наземного дистанционного зондирования АПС.

Исследовательские содары серии ЛАТАН-3, разработанные в Институте физики атмосферы, позволяют осуществлять гибкую настройку параметров зондирования, а применяемая методика обработки сигналов предоставляет данные о структуре АПС с максимально доступным разрешением. Благодаря надежности и простоте в обслуживании аппаратуры были организованы круглогодичные непрерывные измерения в Московском регионе, а так же экспедиционные измерения в различных климатических условиях.

ГЛАВА 3

**КЛИМАТОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ВОЛНАХ
КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА**

В главе приводятся результаты исследований параметров волн Кельвина-Гельмгольца (ВКГ) в Московской области (по архивным содарным данным за 2009–2011 гг.). Приведена статистика повторяемости основных параметров ВКГ: среднегодовые и сезонные распределения суммарной длительности наблюдения эпизодов ВКГ, распределение временных периодов волн и распределение суммарной длительности наблюдения ВКГ по величине вертикального сдвига скорости ветра в низкоуровневых струйных течениях. Приведены статистические сопоставления эмпирических соотношений между длиной волны и амплитудой ВКГ с теоретическими оценками. Представлены данные о пространственно-временных масштабах пакетов ВКГ по результатам синхронного содарного мониторинга АПС в 3-х стационарных пунктах дистанционного зондирования (на ЗНС, на крыше здания ИФА в центре Москвы и на крыше физического факультета МГУ на Ленинских горах). Показаны различия в структуре АПС, определяемые влиянием городского острова тепла. Показана связь частоты наблюдения ВКГ с синоптической ситуацией. Приведены результаты экспедиционных наблюдений ВКГ в Антарктике, в аридных и прибрежных регионах.

3.1 Статистика параметров ВКГ по содарным данным

Непрерывные многолетние содарные измерения параметров атмосферного пограничного слоя, проведенные в ИФА им. А.М. Обухова РАН, позволили составить обширный каталог случаев возникновения внутренних

гравитационно-сдвиговых волн в атмосферном пограничном слое. В нижеприведенных статистических данных использованы архивные данные измерений, выполненных в течение 3-х лет, с 2009 г. по 2011 г. [12].

К настоящему времени разработан и успешно реализован ряд алгоритмов для автоматического выделения волновых структур на содарных эхограммах. Однако, для конкретных содаров и условий измерений (особенно в сильно зашумленном центре мегаполиса) требуется большая дополнительная работа по приспособлению и тестированию автоматического обнаружения. Испытанный в статье [7] метод на основе каскадного классификатора Хаара показал хорошие результаты при идентификации волн в тестовой выборке, однако он требует “обучения” на фрагментах изображений эхограмм с регистрацией волн, таким образом форма структур, идентифицируемых программой, определяется выборкой образцов. Несмотря на возможность доработки и развития, данный метод сложно применить в условиях сильной вариативности форм наблюдаемых волновых структур, а главное, невозможно использовать для различия БВП и разных типов ВКГ. С учетом этого, проводилась традиционная визуальная идентификация эпизодов ВКГ на эхограммах. При анализе содарных данных эпизоды ВКГ выделялись на эхограммах независимо двумя операторами с использованием следующих критериев:

- 1) Форма структур соответствует схематической на Рис. 2.8(в).
- 2) Минимальный период волнообразных структур превышает период посылки зондирующих импульсов (т.е. временное разрешение содара) не менее чем в 12 раз (> 3 минут).

- 3) Толщина слоя волновой активности (т.е. двойная амплитуда волны) превышает высотное разрешение содара не менее чем в 3 раза (> 60 м).
- 4) Глубина модуляции фонового уровня эхосигнала волновой структурой превышает 5 дБ.
- 5) Пакет волнообразных структур содержит не менее 3-х периодов волны.

Идентификация структур с меньшими периодами, длительностью, амплитудой и глубиной модуляции является ненадёжной из-за ограниченного временного и пространственного разрешения содара. ЛАТАН-3 допускает перестройку параметров излучения (несущая частота, длительность и период повторения зондирующих импульсов, чувствительность и т.п.) в широких пределах, однако эти параметры были зафиксированы на указанных выше значениях, исходя из многофункциональности режима мониторинга АПС на ЗНС. Критерии 1) - 5) ограничивают количество ВКГ, и более мелкие и короткие волны не вошли в статистику. На Рис. 3.1 представлены примеры регистрации ВКГ с различной амплитудой и различным периодом наклонных полос на содарных эхограммах в координатах высота-текущее время.

В выбранных примерах эхограмм на Рис. 3.1 структура ВКГ ясно видна, т.к. модуляция интенсивности эхосигнала “полосами” достигает 15–20 дБ. Кроме таких структур, было обнаружено много менее чётких ВКГ, в которых глубина модуляции составляла лишь 5–10 дБ. В статистике не проводится разделения случаев по глубине модуляции, так как такое разделение не приводило к заметным изменениям в статистических распределениях параметров волн. За 3 года круглосуточных измерений было отобрано 234 случая

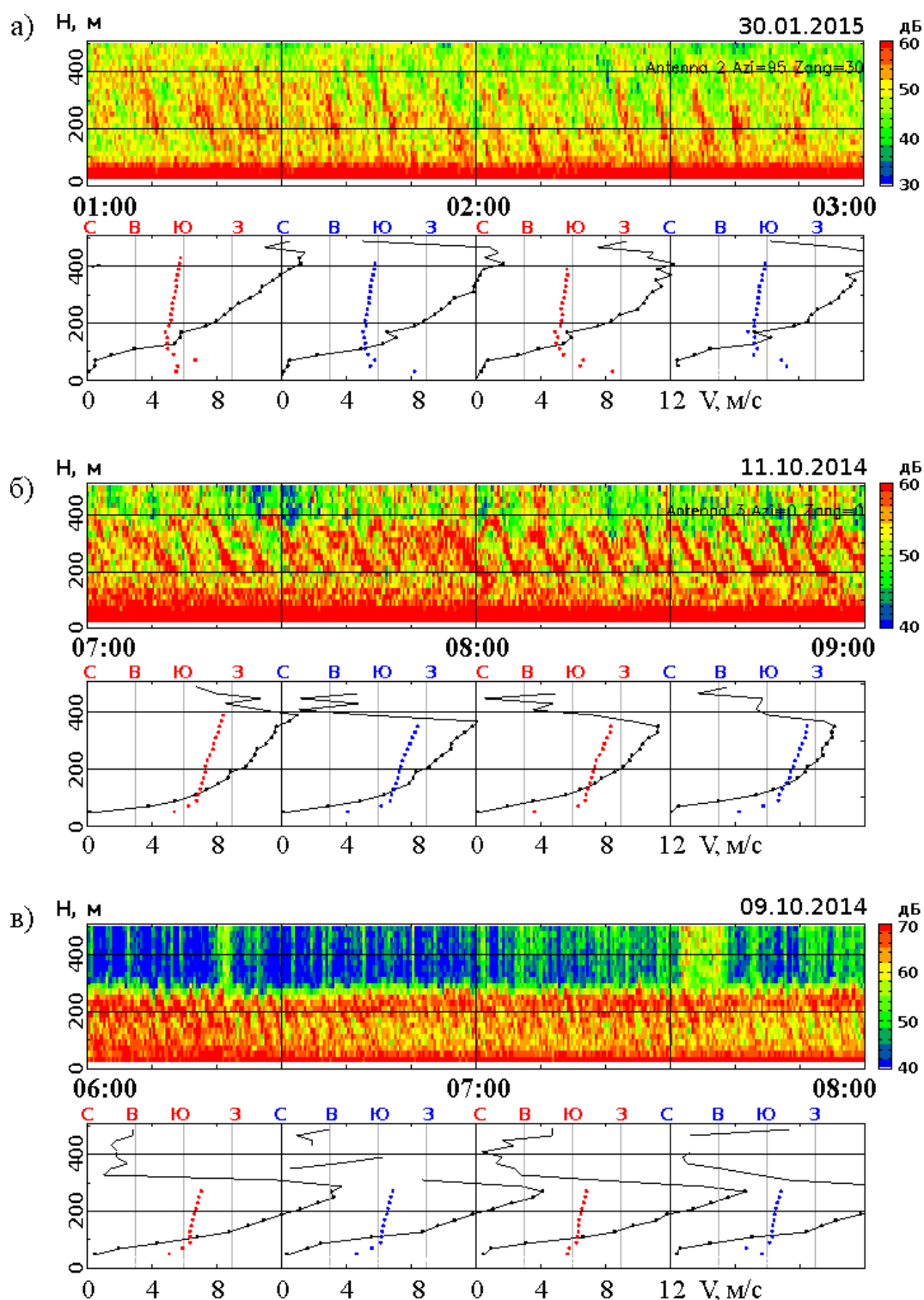


Рис. 3.1. Визуализация ВКГ содаром ЛАТАН-3, ЗНС ИФА. Под эхограммами представлены осреднённые за 30 мин профили модуля горизонтальной скорости (точки, соединённые линиями) и направления ветра в румбах (точки без линий). Значения скорости ветра с малой статистической обеспеченностью изображены линиями без точек.

ВКГ с длительность цугов волн от 15 мин до нескольких часов, соответствующих указанным критериям. Общая длительность эпизодов составила порядка 400 часов.

На Рис. 3.2 приведено распределение суммарной длительности идентифицированных ВКГ по месяцам. Наибольшее количество ВКГ наблюдалось в январе и сентябре, а наименьшее - в феврале, октябре и декабре. Однако, межгодовая изменчивость количества превышает межсезонную изменчивость, поэтому представленное распределение не позволяет сделать определённого заключения о годовом ходе повторяемости ВКГ на ЗНС. По-видимому, их возникновение не связано непосредственно со средней температурой воздуха и с направлением и скоростью ветра, которые имеют сезонный ход.

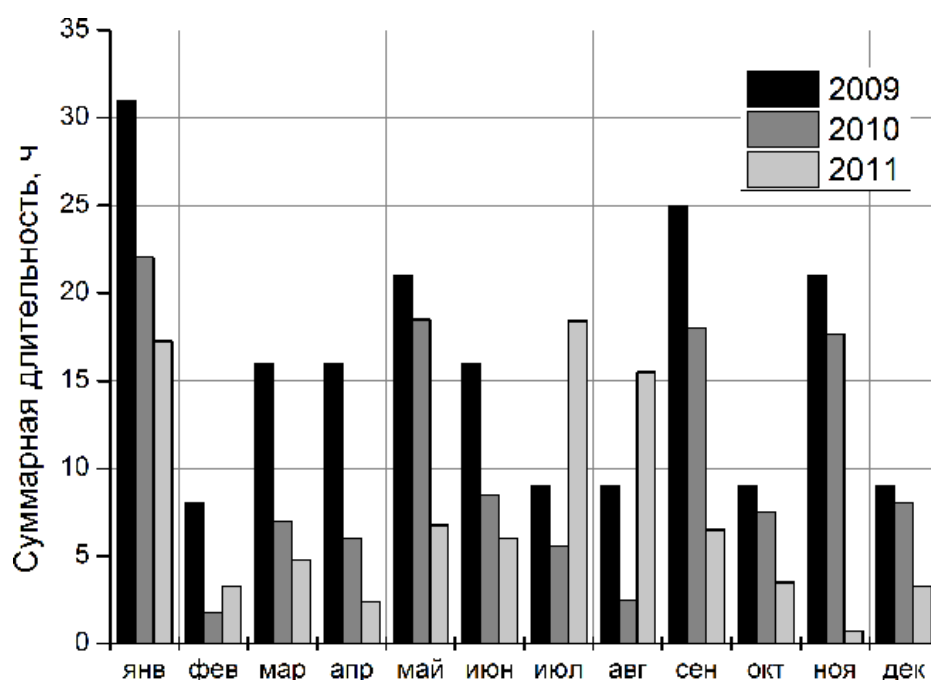


Рис. 3.2. Распределение по месяцам суммарной длительности (в часах) регистрации ВКГ, полученных на ЗНС в 2009–2011 годах.

Средний период полос ВКГ для каждого случая определялся визуально по эхограмме. На Рис. 3.3 представлено распределение зарегистрированных ВКГ по периодам волн. Распределение демонстрирует быстрый спад числа повторений случаев с периодами больше 3 мин. В то же время было

обнаружено несколько эпизодов ВКГ с аномально большими периодами, которые соответствуют длинам волн 5–8 км. Очевидно, что асимметрия этого эмпирического распределения вызвана выбором критериев отбора ВКГ.

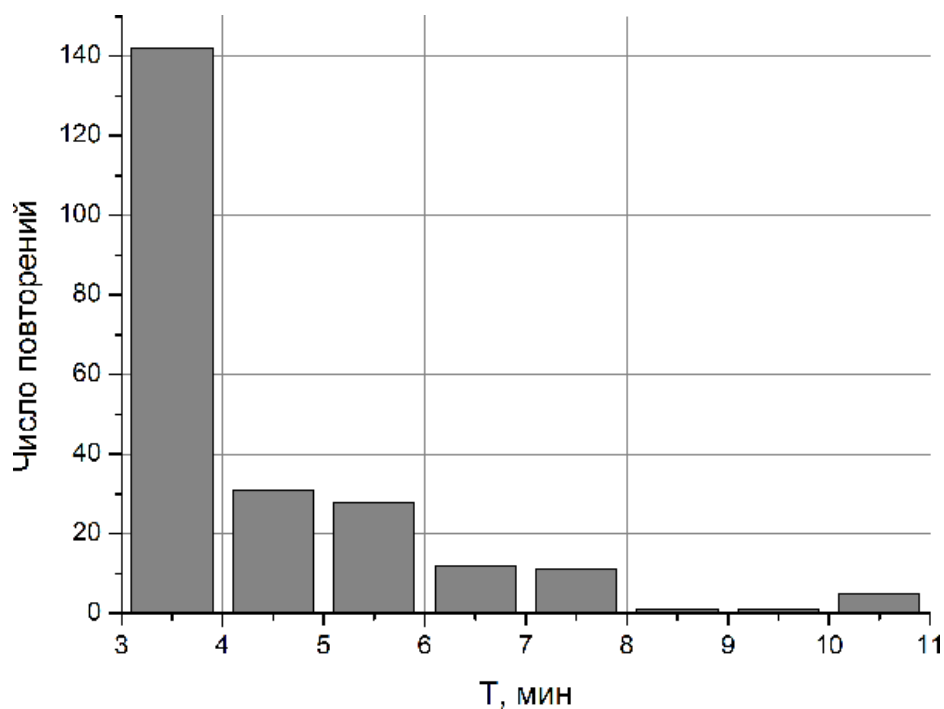


Рис. 3.3. Распределение периодов валов ВКГ на ЗНС в 2009–2011 годах.

Используя гипотезу “замороженной турбулентности” Тейлора можно получить оценку для длины наблюдаемой волны как произведение периода, определяемого по эхограмме, и средней скорости ветра в слое с ВКГ. Этот параметр позволяет провести качественное сравнение с результатами модельных представлений о ВКГ. По теореме Говарда о полуокружности [56] необходимым условием неустойчивости слоя является критерий для числа Ричардсона: $Ri < 1/4$ в какой-либо области внутри слоя. Тогда в среде могут возникнуть гравитационно-сдвиговые волны с положительной скоростью роста, зависящей от волнового числа и числа Ричардсона. Область значений, которые может принимать отношение длины внутренней гравитационно-сдвиговой волны L к толщине слоя волновой активности h , зависит от вида модели высотных изменений плотности и скорости движения среды, а также от числа Ричардсона. Таким образом, можно исследовать (аналогично

[26]), насколько измерения согласуются с теоретическими моделями, а также лабораторными и численными экспериментами по исследованию неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Ранние теоретические исследования показали, что длина волны и характер движения с максимальной скоростью роста зависит от профилей скорости и устойчивости и наличия твердой нижней границы [36; 76]. Типичные значения длины волны лежат в диапазоне от $L = 2\pi h$ до $7,5h$ [77]. Глубина, на которую слой перемешивается, зависит также от характеристик и начальной степени неустойчивости потока. Лабораторные и двумерные численные исследования показали зависимость максимальной амплитуды одновременно как от числа Ричардсона, так и от числа Рейнольдса, причем большие валы (и более глубокий слой перемешивания) соответствуют меньшим Ri и большим Re [100]. Эти результаты были подтверждены и расширены в ходе последних трехмерных модельных исследований неустойчивости КГ и перехода к турбулентности [105]. В частности исследования показали обратную зависимость амплитуды валов и толщины слоя перемешивания от Ri при фиксированной L .

На Рис. 3.4 представлена зависимость рассчитанного по гипотезе “замороженности” пространственного периода (длины волны) L от толщины слоя h , которая соответствует двойной амплитуде колебаний, определявшейся визуально по эхограмме. Точность визуального определения периода и амплитуды волны ограничена разрешающей способностью содара. Средняя скорость потока рассчитывалась как среднее арифметическое максимального и минимального значений в слое. Среднее отношение L/h , рассчитанное для 234-х случаев составило 9,2, что сравнимо с величиной $L/h = 7,5$, соответствующей наиболее быстро растущей моде в модели с линейными профилями скорости и плотности [77]. Это теоретическое соотношение также приведено

на Рис. 3.4. На Рис. 3.4 также приведен диапазон значений $L/h = 2,5 \div 20$, наблюдавшихся в лабораторных исследованиях [35; 100].

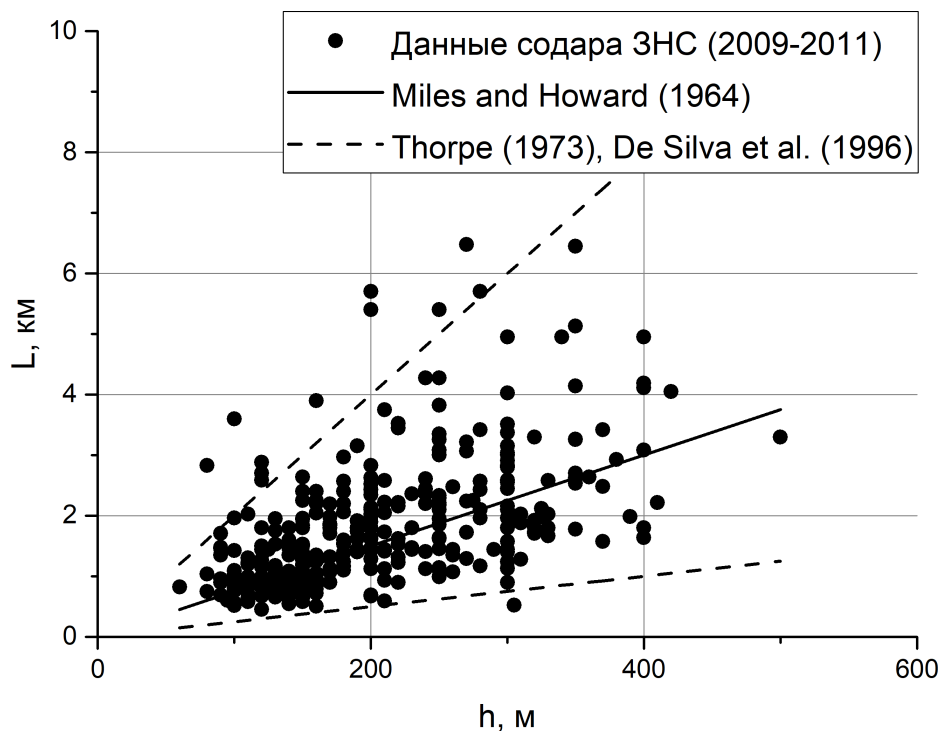


Рис. 3.4. Зависимость пространственного периода L внутренних гравитационно-сдвиговых волн от толщины слоя волновой активности h на ЗНС в 2009–2011 г. Сплошная линия - теоретическое соотношение $L/h = 7,5$, полученное для модели с линейными профилями скорости и плотности [77]. Пунктирные линии - диапазон значений $L/h = 2,5 \div 20$, наблюдавшихся в лабораторных исследованиях при различных числах Рейнольдса и разных стадиях развития неустойчивости [35; 100].

Для выяснения связи между величиной сдвига ветра и возникновением ВКГ были отдельно рассчитаны сдвиги в нижней части всех НСТ, наблюдавшихся на ЗНС в 2009 году, и тех течений, при которых наблюдались ВКГ. В литературе нет общепринятого метода оценки величины сдвига скорости ветра в слое, так как формы вертикальных профилей скорости отличаются значительным разнообразием. В данной работе сдвиг ветра в слое рассчитывался как разность максимального и минимального значения скорости ветра в слое, отнесенная к толщине слоя. На Рис. 3.5 приведено распределение суммарной длительности ВКГ при различных сдвигах ветра для всех случаев за 2008–2011 годы, а также распределение для осредненных

за один час сдвигов ветра в ночных НСТ за 2009 год, рассчитанных по эхограммам. Форма распределения для случаев с ВКГ не имеет заметных отличий: оба распределения близки к нормальному с максимумом при сдвиге равном 3,5 м/с на 100 м и с небольшой асимметрией в сторону больших сдвигов. Таким образом, в наблюдениях не обнаружено непосредственного (т.е. без учёта градиента температуры) влияния величины сдвига скорости ветра на возникновение ВКГ.

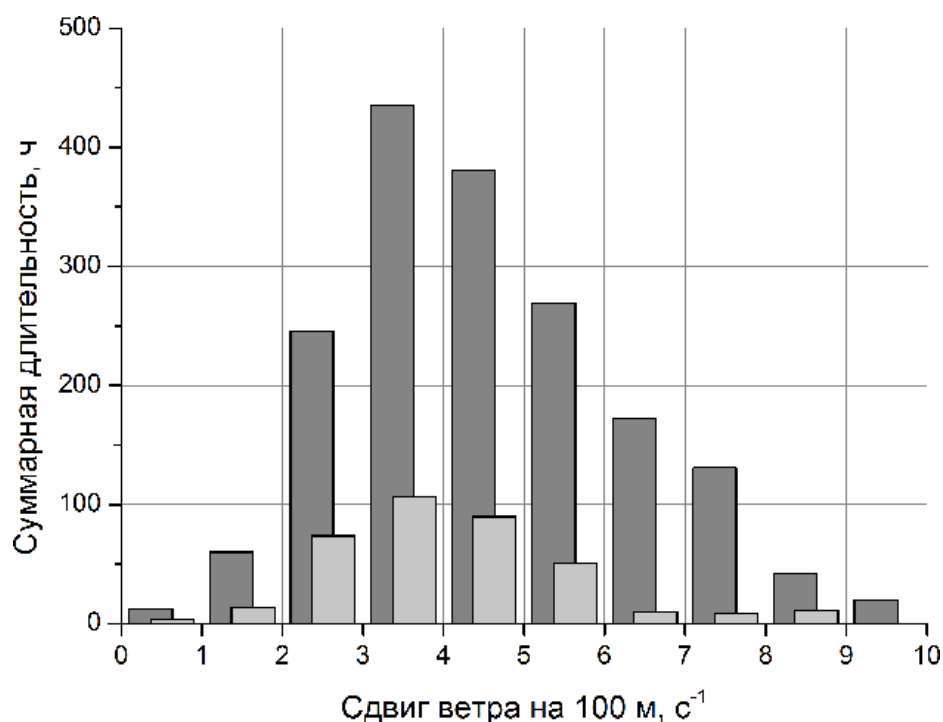


Рис. 3.5. Распределение суммарной длительности (в часах) наблюдения ВКГ при различных вертикальных сдвигах скорости ветра в НСТ в 2008–2011 годах (светло-серый цвет) и распределение длительности наблюдения ночных НСТ с различными величинами вертикальных сдвигов в 2009 г. (темно-серый).

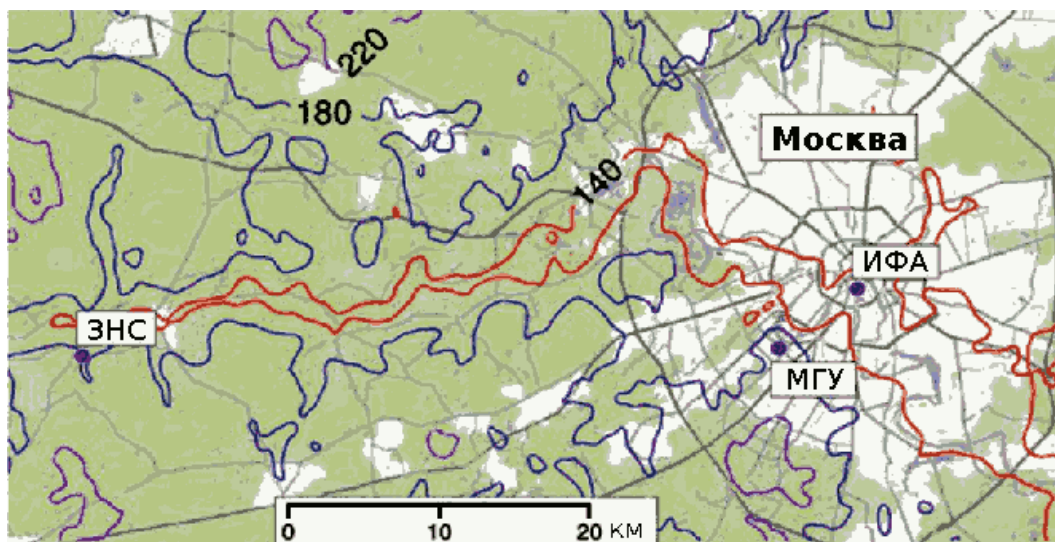
В целом, представленные результаты дают довольно обширную статистику распределений параметров ВКГ. В основном, наблюдались волны в форме “наклонных полос” на высоте 100–300 м, при сдвигах ветра 3–5 м/с на 100 м. Типичные параметры наблюдаемых волн: длина волны 400–4000 м, двойная амплитуда (толщина слоя волновой активности) 60–300 м, среднее соотношение между длиной волны и толщиной слоя $L/h = 9,2$. Полученные

оценки для толщины слоя и периода находятся в согласии со статистикой по 72 эпизодам регистрации ВГВ на эхограммах, полученной методом автоматизированной идентификации волн и их параметров в упомянутой выше работе [7], а также с данными, приведенными в Таблице 1.1.

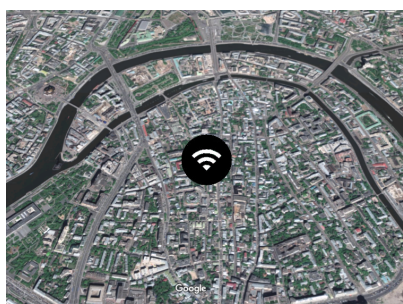
3.2 Пространственные масштабы пакетов ВКГ

Измерения параметров АПС в одной точке, к которым относятся со-
дарные измерения, не дают информации о пространственных масштабах
наблюдаемых явлений. Грубые оценки пространственных характеристик
могут быть получены только на основе гипотезы Тейлора, которую не все-
гда можно корректно применять при рассмотрении волновых процессов.
Однако некоторые выводы о масштабах можно сделать на основе анализа
многоточечных измерений. В ходе работы получены статистические данные
о волновой активности на территории большого равнинного региона, вклю-
чающего в себя как крупный мегаполис, так и сельскую местность. Был
проведен визуальный анализ эхограмм, полученных синхронно в трех ста-
ционарных пунктах сети дистанционного зондирования АПС в Московском
регионе: (1) в центре Москвы, на крыше здания ИФА РАН, (2) на юго-западе
города, на крыше физфака МГУ, в относительно слабо урбанизированной
зоне, и (3) в сельской местности на ЗНС, расположенной в 50 км к западу
от центра Москвы (Рис. 3.6).

Для исследования горизонтальной протяженности областей волновой ак-
тивности нами использовались архивные данные зондирования за 2011-2014
годы. За эпизод ВКГ принималась различимая на эхограмме периодиче-
ская структура в виде наклонных полос, длящаяся более получаса. При
идентификации использовались более мягкие критерии, чем приведенные в



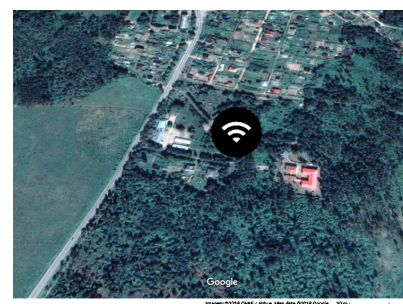
(a)



(б)



(в)



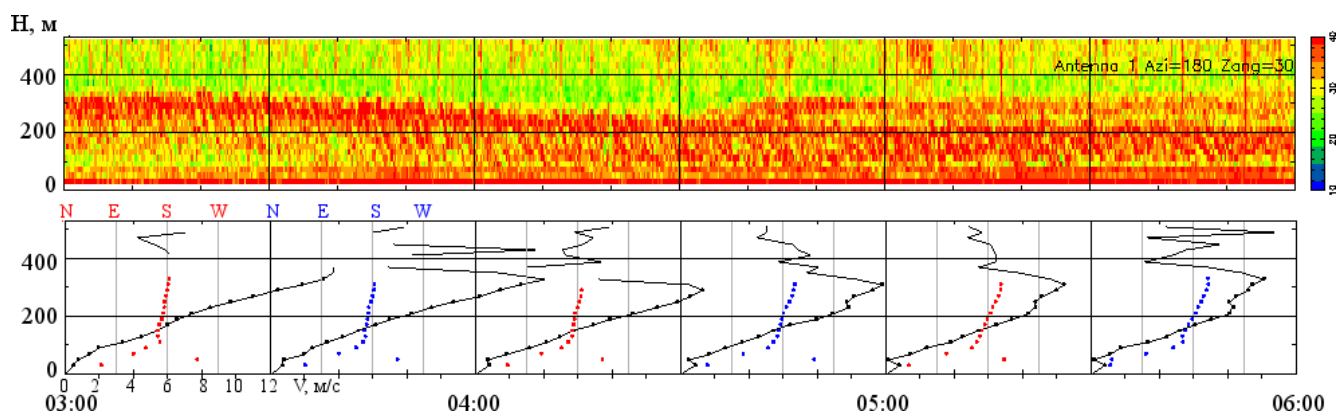
(г)

Рис. 3.6. Мезомасштабная сеть содарного мониторинга АПС в Московской области. а) Схема расположения 3-х пунктов экспериментальной мезомасштабной сети мониторинга АПС в Московском регионе; ЗНС — Звенигородская научная станция ИФА, МГУ — физический факультет Московского государственного университета, ИФА — Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Белым цветом отмечены районы городской застройки. Цифры около изолиний - высота в метрах над уровнем моря. б)-г) спутниковые фотографии расположения измерительных пунктов сети: б) ИФА, центр г. Москвы в) МГУ, юго-западный АО г) ЗНС, сельская местность.

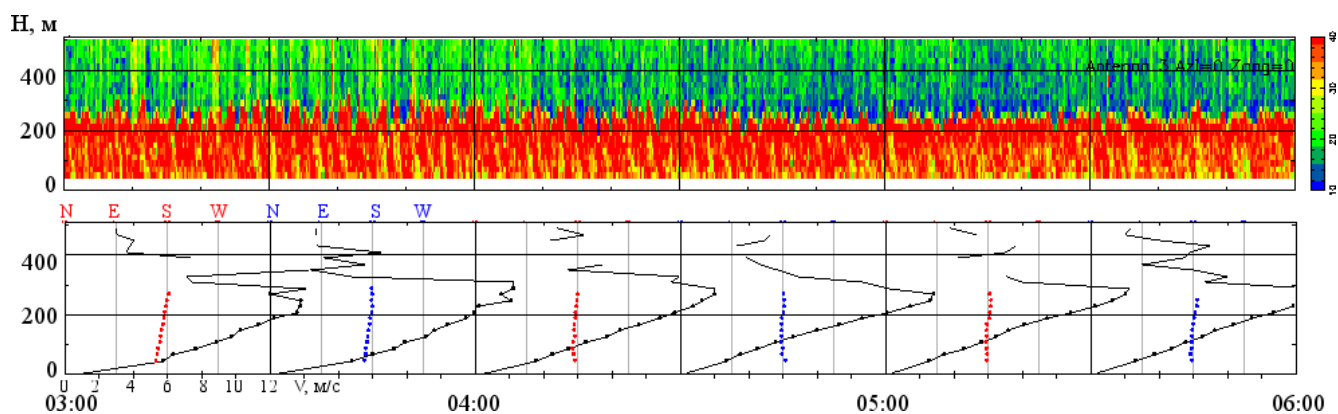
параграфе 3.1, а также использовались модифицированные программы обработки и визуализации, описанные в параграфе 2.2.3. В результате, количество обнаруженных эпизодов ВКГ (более 300 эпизодов за год для ЗНС) резко увеличилось по сравнению с количеством, полученным при использовании стандартных программ для многофункциональных содарных исследований (около 200 эпизодов за 3 года). Пример эхограмм с синхронной регистрацией ВКГ на всех трех пунктах приведен на Рис. 3.7.

Одновременные эпизоды ВКГ в МГУ и на ЗНС (расстояние между пунктами ~ 50 км) были зарегистрированы в 80% от числа дней в году. Только в МГУ эпизоды ВКГ наблюдались в 5% дней, а только на ЗНС — в 12% дней. Лишь в 6% дней в году ни в одном из пунктов измерений не было зарегистрировано волновой активности. В Таблице 3.1 приведена подробная статистика регистрации ВКГ на пунктах МГУ и ЗНС за 2012 год. Годовая изменчивость статистических соотношений мала. На эхограммах содара ИФА волны наблюдались значительно реже, чем на двух других пунктах, что связано с высоким уровнем акустического шума в центре города.

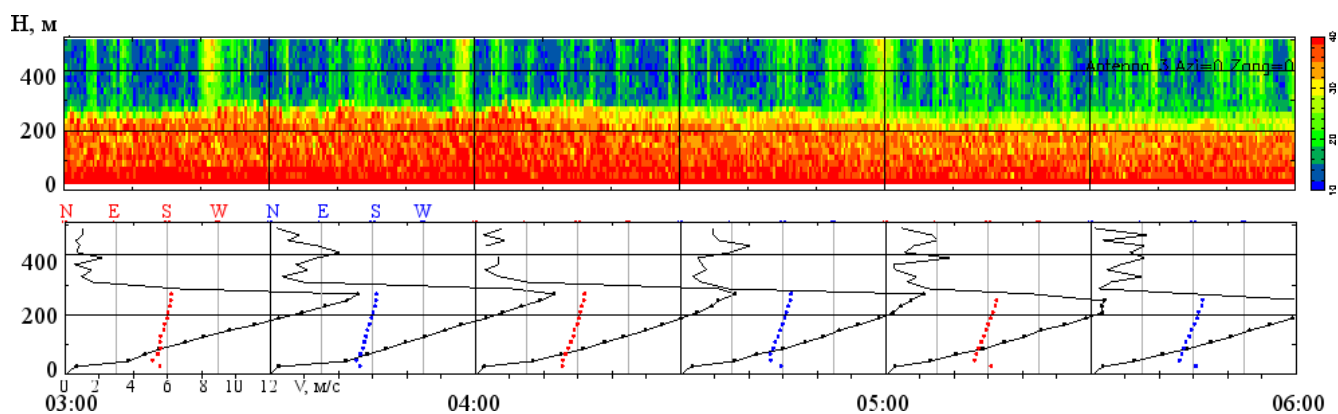
По эпизодам синхронного детектирования ВКГ на пунктах ИФА и МГУ можно выделить характерные различия, наблюдаемые в мезомасштабной турбулентной структуре АПС в центре города и на окраине. Турбулентная структура АПС в центре города хуже различается на эхограммах вследствие сильной зашумленности. В центре города утренний подъем инверсионного слоя начинается раньше, турбулизированный слой поднимается выше (до 200 м разницы), имеет меньшую толщину. В центре города ВКГ наблюдаются, как правило, именно в приподнятых инверсионных слоях. Волны в слое приподнятой инверсии в центре имеют меньшую амплитуду и слабее выделяются в поле C_T^2 . Данные различия в параметрах ВКГ можно видеть на примерах синхронного детектирования ВКГ в ИФА и МГУ, приведенных на



(а) ИФА



(б) МГУ



(в) ЗНС

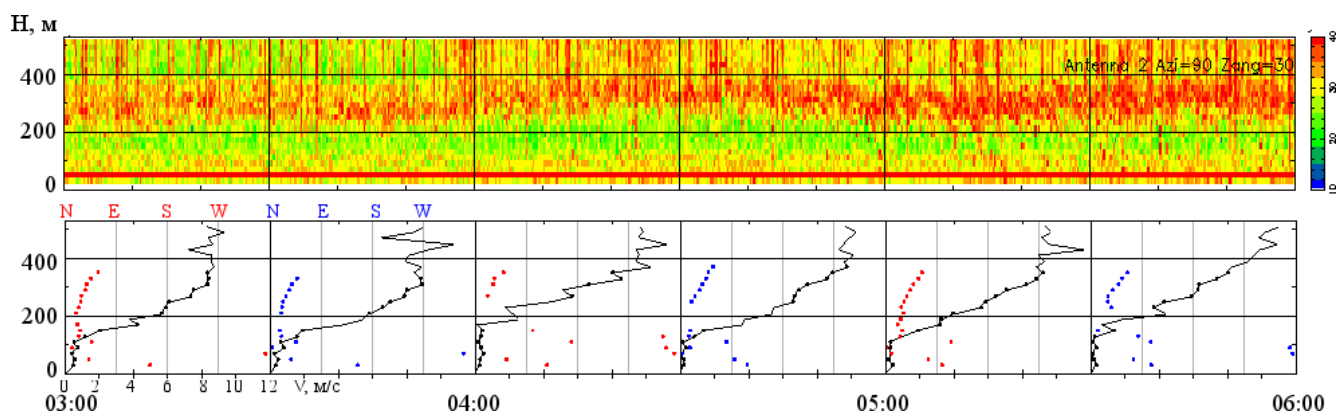
Рис. 3.7. Пример синхронной регистрации ВКГ в виде наклонных полос на содарных эхограммах в трех пунктах сети зондирования АПС, 29.09.2012. На рисунках верхняя панель — содарные эхограммы, нижняя панель — профили скорости и направления ветра, осредненные за 30 мин. Справа от эхограмм дана цветовая шкала относительной интенсивности эхо-сигнала в децибелах. Под панелью профилей скорости даны шкалы скоростей и указано местное время; а над панелями обозначены румбы направления ветра N, E, S, W. Профили скорости показаны линиями с точками, линии без точек — данные о скорости, имеющие малое статистическое обеспечение. Профили направления ветра показаны точками без линий. а) пункт наблюдений ИФА, центр города; б) пункт наблюдений МГУ, окраина города; в) пункт наблюдений ЗНС, сельская местность.

Таблица 3.1. Количество дней с эпизодами ВКГ, наблюдавшимися в 2012 году в двух стационарных пунктах дистанционного мониторинга АПС: в МГУ и на ЗНС.

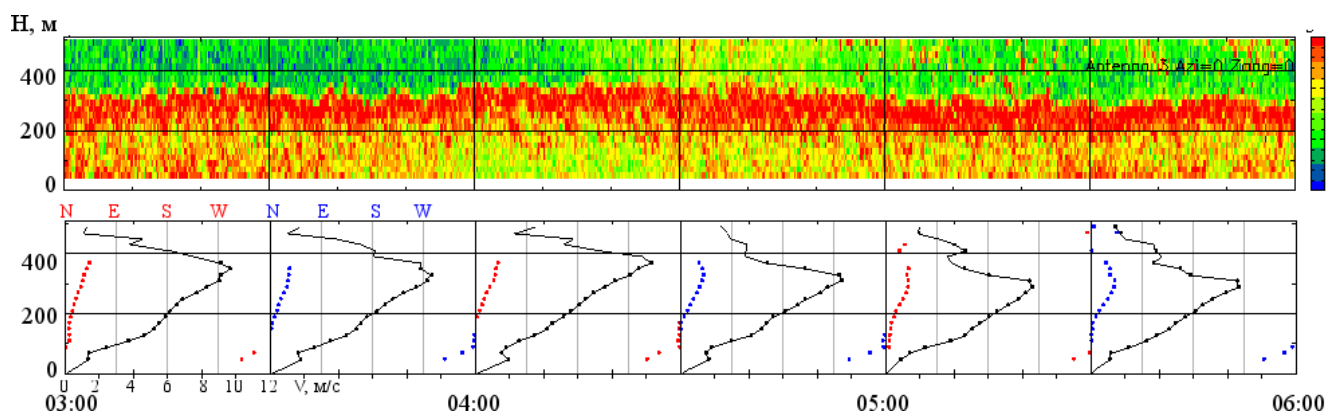
	В обоих пунктах	Только МГУ	Только ЗНС	Без ВКГ
Январь	25	0	5	0
Февраль	15	7	6	1
Март	20	2	9	0
Апрель	21	1	6	2
Май	26	1	3	1
Июнь	26	1	3	0
Июль	30	0	1	0
Август	26	1	3	1
Сентябрь	28	1	1	0
Октябрь	23	0	4	4
Ноябрь	16	4	1	9
Декабрь	24	1	2	4
За год (366 дней)	281 (77%)	19 (5%)	44 (12%)	22 (6%)

Рис. 3.7(а,б), 3.8 и 3.9. На Рис. 3.8 на эхограмме ИФА (а) инверсионный слой достигает высоты 400 м и имеет толщину порядка 100 м, на эхограмме МГУ (б) инверсионный слой на поднимается выше 350 м, его толщина достигает 200 метров. Амплитуда наблюдаемых ВКГ также в два раза превышает амплитуду волн в ИФА. На Рис. 3.9 разница в толщине инверсионных слоев достигает 200 м.

Аналогично, различия можно наблюдать при сопоставлении эхограмм ВКГ зарегистрированных синхронно в МГУ и на ЗНС: турбулизированный слой инверсии в МГУ, как правило, толще, чем в сельской местности. В соответствии с этим, как правило, амплитуда и период ВКГ, наблюдаемых



(a) ИФА



(б) МГУ

Рис. 3.8. Локальные различия при синхронном наблюдении ВКГ на пунктах ИФА и МГУ, 05.07.2012. а) Пункт наблюдений ИФА, центр города; б) пункт наблюдений МГУ, окраина города. Обозначения такие же, как на Рис. 3.7.

в сельской местности, меньше, чем в МГУ. Утренний подъем инверсионного слоя и его дальнейшее разрушение в городе также начинается раньше. Примеры сопоставления эхограмм с синхронной регистрацией ВКГ в МГУ и на ЗНС приведены на Рис. 3.7(б,в) и Рис. 3.10.

Исходя из визуального анализа содарных данных можно утверждать, что ВКГ на эхограммах содара ЗНС наблюдаются практически всегда, если они есть на эхограммах содара МГУ. Редкие случаи, когда волны наблюдаются только в МГУ, могут объясняться тем, что структура АПС над городом имеет существенные локальные особенности. Например, иногда над ИФА и МГУ наблюдаются приподнятые инверсии, отсутствующие на ЗНС. В случаях мелких инверсий ВКГ не всегда разрешаются на эхограммах

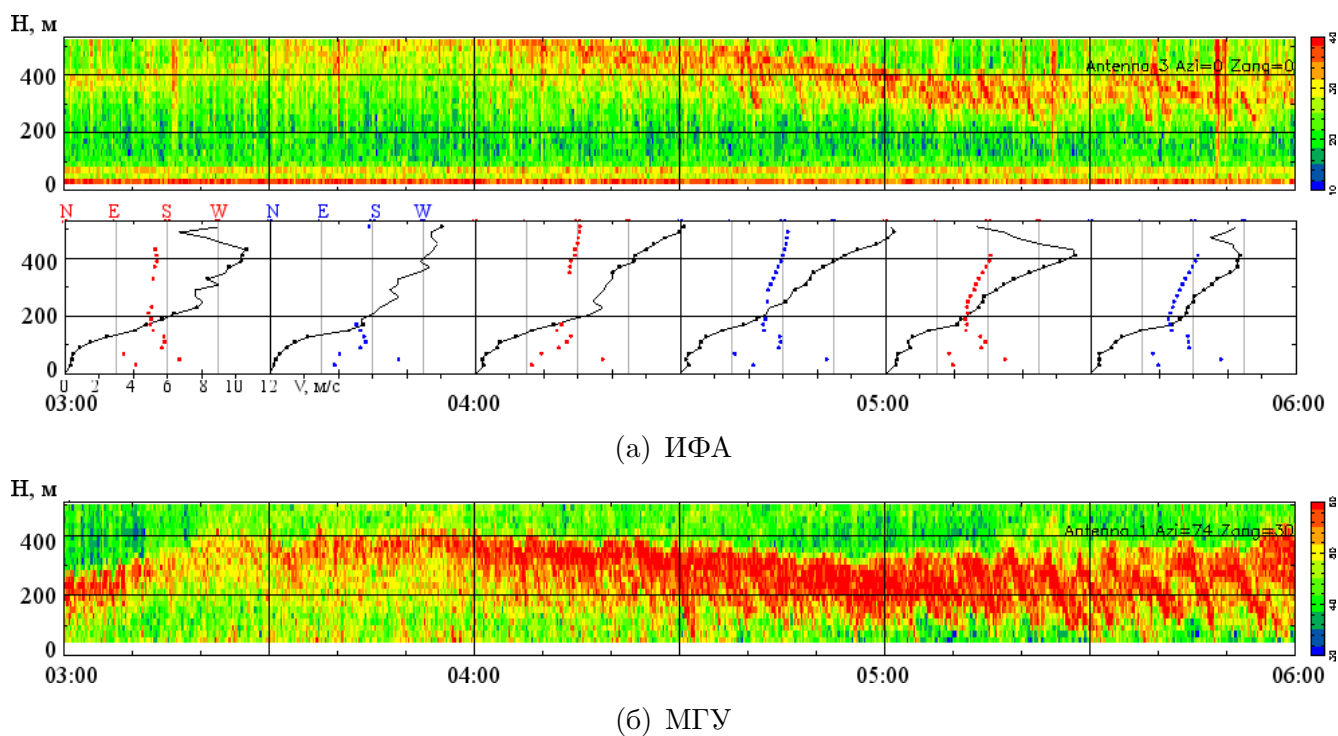
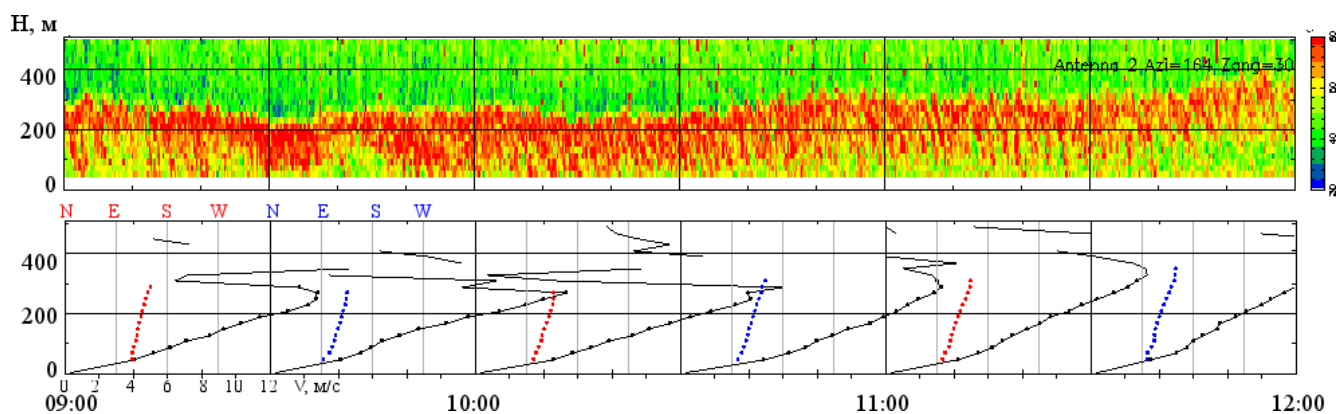


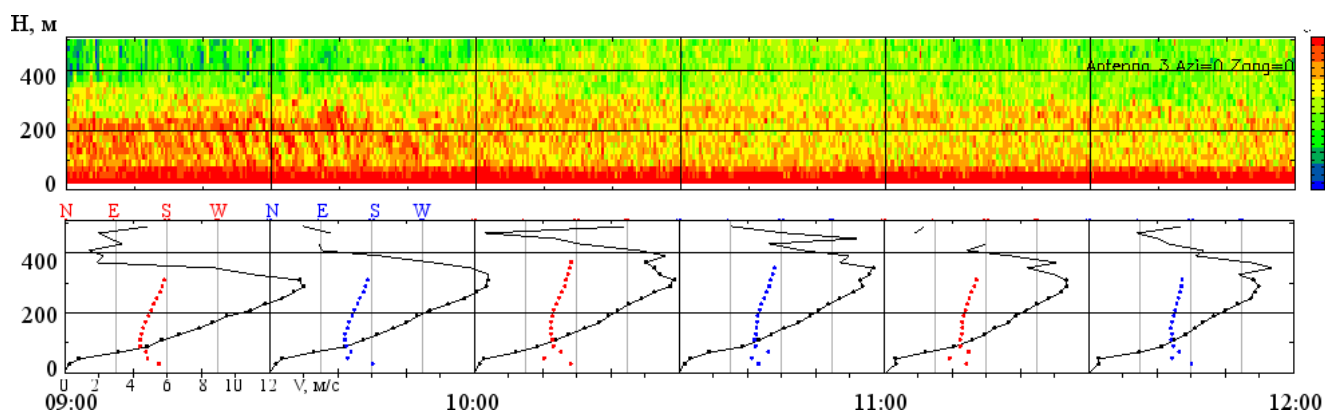
Рис. 3.9. То же, что на Рис. 3.8, но для 28.08.2012. (Профили скорости и направления ветра по содару МГУ отсутствуют для этой даты).

ЗНС (в МГУ, как правило, толщина турбулизированного инверсионного слоя больше вследствие влияния городского острова тепла). Однако даже в таких случаях ВКГ обычно можно различить в период утреннего подъема и разрушения инверсионного слоя. На Рис. 3.11 приведен пример синхронных эхограмм МГУ и ЗНС для случая, когда волны наблюдаются только в МГУ.

Время жизни пакетов ВКГ обычно составляла от одного до нескольких часов. В летнее время волновая активность иногда наблюдалась непрерывно в течение всего темного времени суток. Зимой, когда образуются долговременные, порой многосуточные инверсии над снежной поверхностью, время жизни цугов ВКГ доходило до 10–15 часов. При синхронных наблюдениях ВКГ были зафиксированы различные направления скорости ветра, в том числе перпендикулярное направлению Москва–ЗНС. Такие результаты наблюдений показывают, что региональные синоптические условия играют ключевую роль для возникновения внутренних гравитационно-сдвиговых волн, и преобладают над локальными особенностями местности наблюдения.



(a) МГУ



(б) ЗНС

Рис. 3.10. Локальные различия при синхронном наблюдении ВКГ на пунктах МГУ и ЗНС, 23.09.2012. а) Пункт наблюдений МГУ, окраина города; б) пункт наблюдений ЗНС, сельская местность.

Таким образом, в случае регистрации ВКГ описанного типа на одном измерительном пункте, можно сделать вывод о наличии и характере волновой активности во всем регионе.

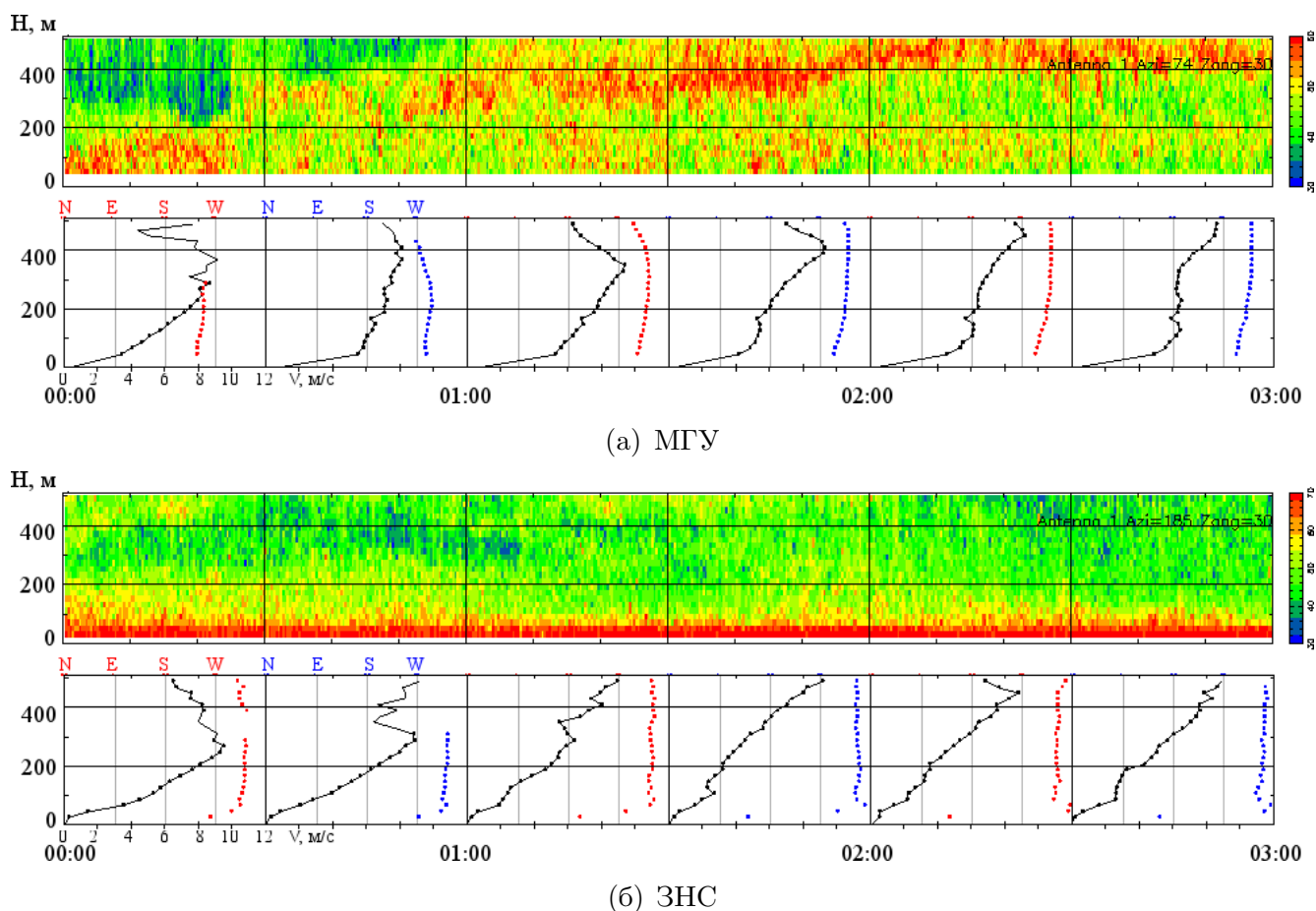


Рис. 3.11. Существенные различия в структуре АПС на пунктах МГУ и ЗНС, 02.08.2012. а) Пункт наблюдений МГУ, окраина города – наблюдается приподнятая инверсия и ВКГ; б) пункт наблюдений ЗНС, сельская местность — мелкая приземная инверсия, волны не видны.

3.3 Синоптические условия, благоприятствующие возникновению ВКГ в АПС

Были проведены сопоставления характерных региональных эпизодов ВКГ (с одновременной регистрацией на пунктах МГУ и ЗНС) из архива соударных измерений в Московской области за 2012–2014 гг. с синоптическими картами по данным реанализа. Отдельно рассматривались ситуации высокого давления (антициклональные условия), низкого давления (циклональные условия) и атмосферных фронтов в регионе измерений.

В антициклонах наблюдается регулярный суточный ход эволюции мезомасштабной турбулентной структуры АПС. За счет радиационного выхолаживания ночью образуются приземные инверсии, в которых наблюдаются низкоуровневые струйные течения с большими сдвигами ветра; после восхода солнца начинается рост толщины инверсионного слоя с последующим его подъемом и разрушением, и переходом к конвекции. Однако, несмотря на большие градиенты скорости ветра в ночное время, ВКГ в антициклонах регистрируется редко: слой ночной приземной инверсии, как правило, слишком тонок для разрешения его структуры с помощью стандартных содаров (Рис. 3.12). Примеры регистрации таких мелкомасштабных ВКГ с помощью минисодара высокого разрешения были приведены в работе [21]. Также отсутствие волн может объясняться тем, что при обычной для антициклонов сильно-устойчивой стратификации ночного АПС число Ричардсона превышает критическое значение $Ri_{cr} = 0,25$, т.е. нарушается необходимое условие возникновения в потоке неустойчивости Кельвина-Гельмольца: $Ri < Ri_{cr}$ [48].

В то же время ВКГ практически всегда наблюдаются во время утреннего подъема инверсии в течение 2–3 часов до разрушения инверсионного слоя. Пример наблюдения ВКГ при утреннем подъеме инверсионного слоя приведен на Рис. 3.13. Время регистрации волн может отличаться для различных пунктов наблюдения в одном регионе из-за различных факторов, влияющих на время подъема инверсионного слоя: характер подстилающей поверхности, влияние городского острова тепла. В условиях антициклонов не наблюдается обширных цугов ВКГ регионального масштаба с длительностями более трех часов.

В условиях низкого давления ВКГ регистрируются относительно редко. Циклоны обычно характеризуются сплошной облачностью, при которой

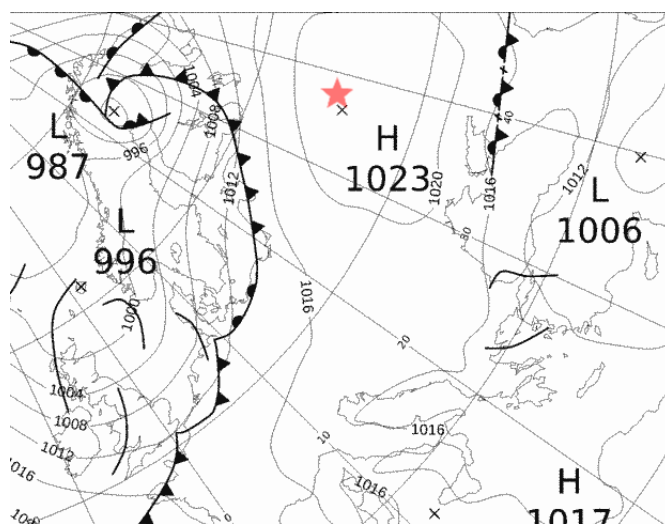
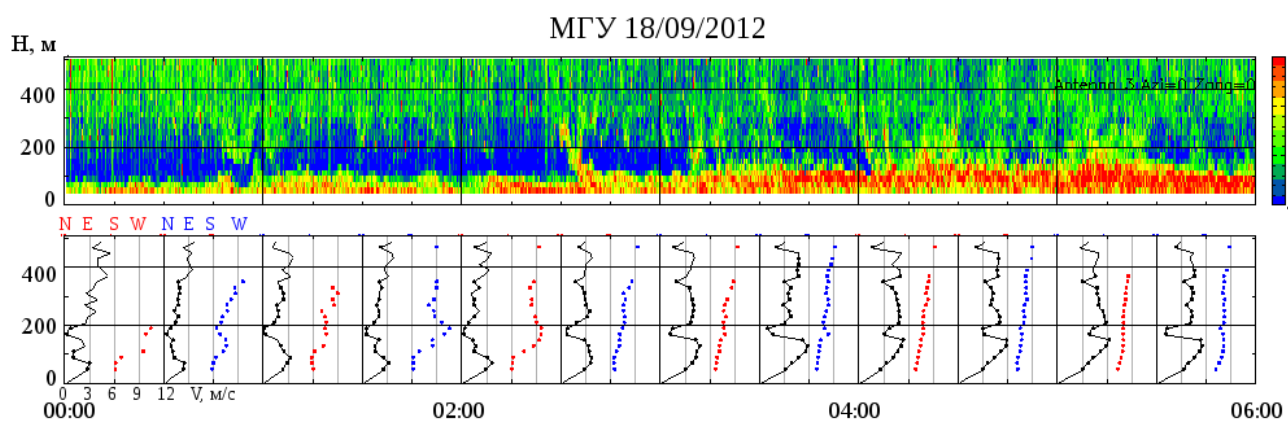
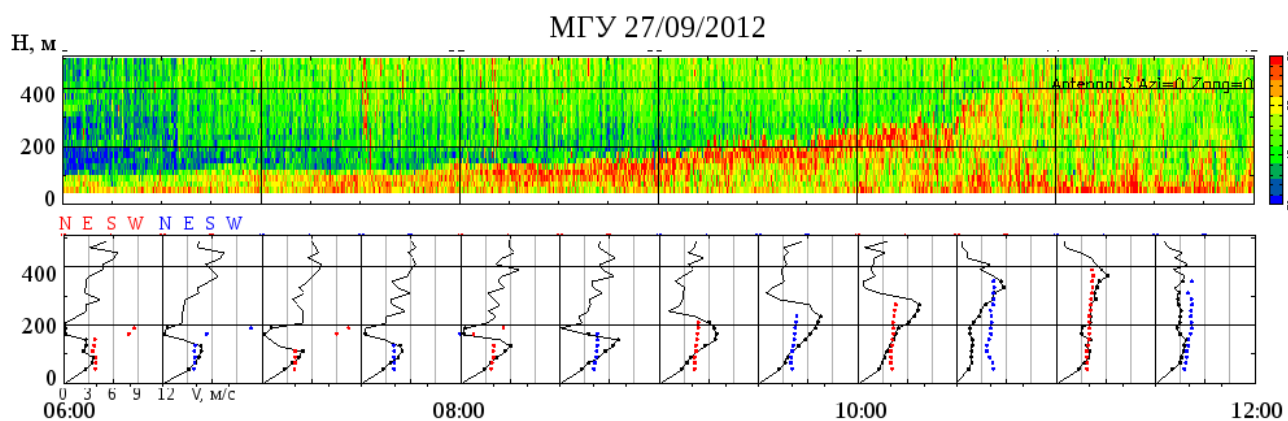
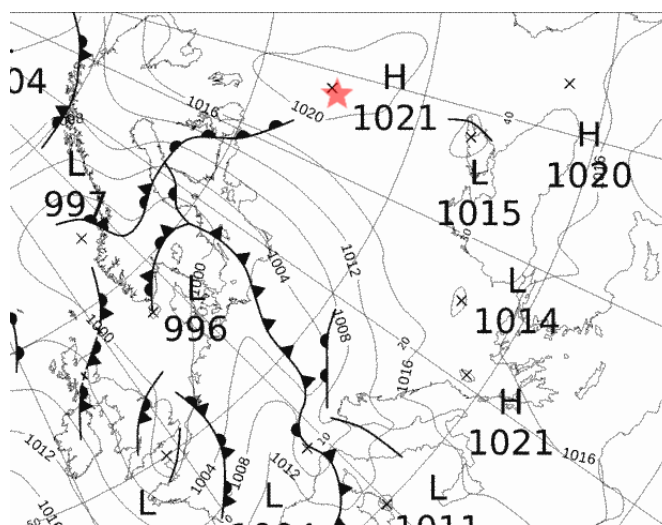


Рис. 3.12. Мелкая приземная инверсия с плохо разрешаемой структурой при антициклоне, 18.09.2012. а) Эхограмма и профили скорости и направления ветра по данным содара МГУ. Справа от эхограммы дана цветовая шкала относительной интенсивности эхо-сигнала в децибелах. Под панелью профилей скорости даны шкалы скоростей и указано местное время; а над панелями обозначены румбы направления ветра N, E, S, W. Профили скорости показаны линиями с точками, линии без точек — данные о скорости, имеющие малое статистическое обеспечение. Профили направления ветра показаны точками без линий. б) Синоптическая карта 00 UTC 18.09.2012 по данным реанализа. Красной звездочкой обозначен регион содарных измерений.



(а) Содарная эхограмма

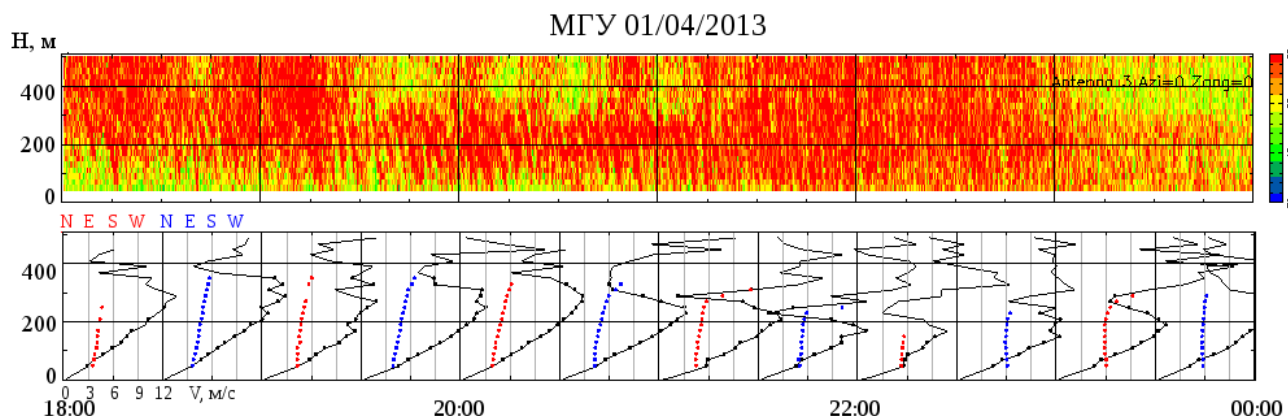


(б) Синоптическая карта

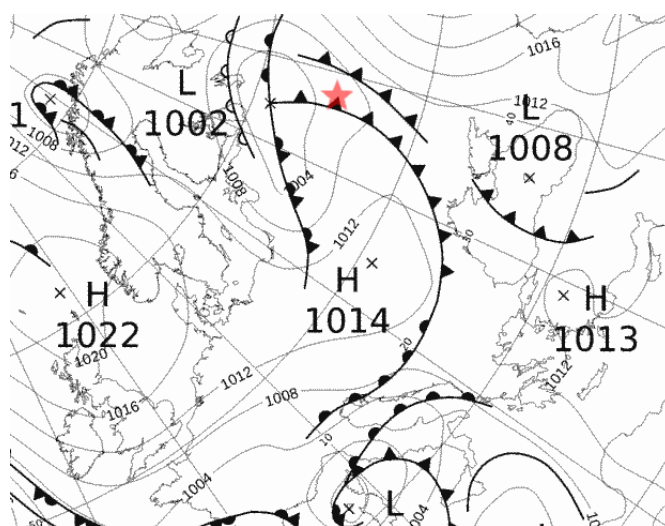
Рис. 3.13. ВКГ в поднимающемся инверсионном слое при антициклоне, 27.09.2012. а) Содарная эхограмма; б) синоптическая карта 00 UTC 27.09.2012. Обозначения как на Рис. 3.12.

не развиваются низкоуровневые струйные течения, где обычно образуются сдвиговые волны. Кроме того, значительную часть времени наблюдаются осадки, и содарные данные для этих эпизодов сильно зашумлены. Редкие интенсивные цуги гравитационно-сдвиговых волн, а также бегущих волн или обрушающихся волн Кельвина-Гельмгольца можно наблюдать в циклонических условиях при прохождении фронтов, сопровождающихся большими градиентами метеорологических величин. На Рис. 3.14 приведен пример наблюдения четких ВКГ большой амплитуды при прохождении атмосферного

фронта в условиях антициклона. Области интенсивного сигнала в верхней части содарной эхограммы являются шумами, вызванными дождем.



(а) Содарная эхограмма



(б) Синоптическая карта

Рис. 3.14. Пример регистрации ВКГ большой амплитуды вблизи атмосферных фронтов в условиях низкого давления при наличии осадков, 01.04.2013. а) Содарная эхограмма; б) синоптическая карта 00 UTC 02.04.2013. Обозначения как на Рис. 3.12.

Обширные и длительные цуги ВКГ обычно наблюдаются при наличии больших градиентов приземного давления на границах барических образований (Рис. 3.15) или при прохождении атмосферных фронтов (Рис. 3.16). На границах антициклонов и при переходных условиях, когда сохраняется ясная погода, регулярно регистрируются обширные цуги ВКГ длительностью до 10 часов и более (наблюдаемые все время существования ночной приземной

инверсии). Возможны два различных фактора, объясняющих связь волновой активности в АПС с такими синоптическими условиями:

- 1) вследствие умеренной облачности и слабой статической устойчивости АПС, числа Ричардсона часто принимают значения меньше критического, и возникает неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, приводящая к развитию ВКГ;
- 2) вследствие бароклинности тропосферы в ней генерируются бегущие гравитационные волны, которые частично захватываются существующим в струйном течении приземным волноводом. Такие захваченные волны проявляются как стоячие колебания плотности воздуха в волноводе, похожие на сдвиговые волны Кельвина-Гельмгольца.

Влияние атмосферных фронтов на генерацию тропосферных инерционно-гравитационных волн было недавно рассмотрено в работе [90]. По-видимому, основные выводы этой работы могут быть также отнесены к ВКГ в атмосферном пограничном слое.

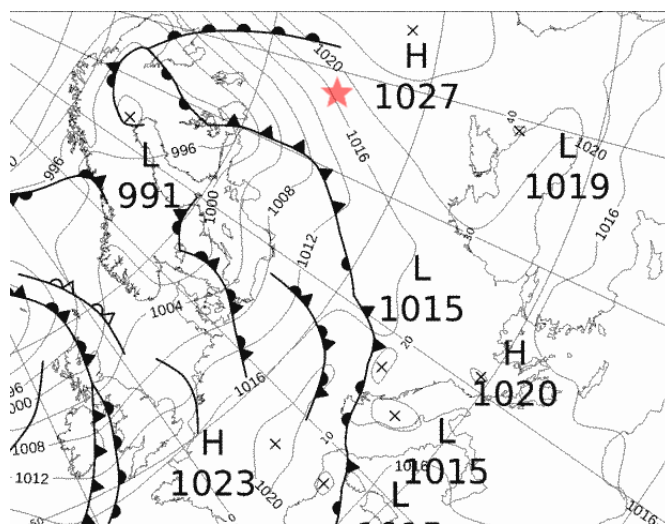
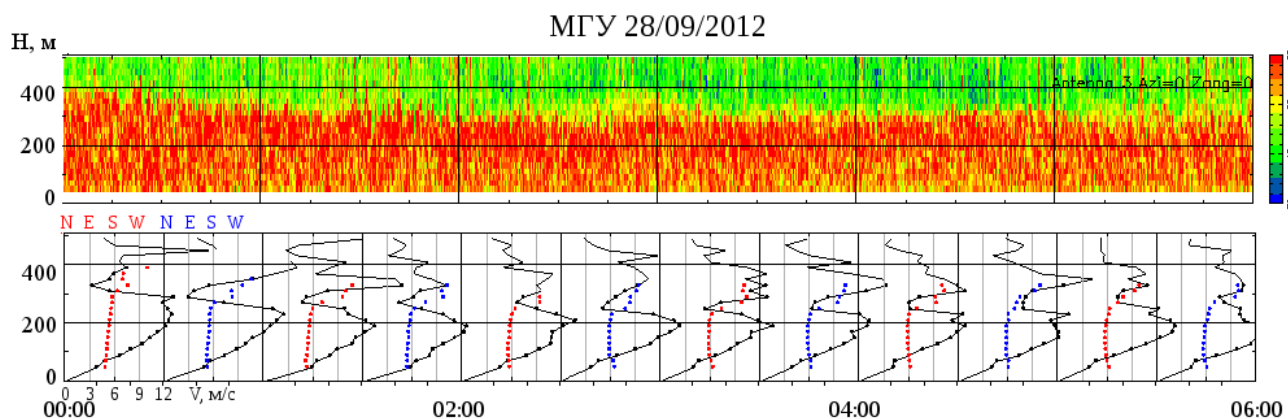
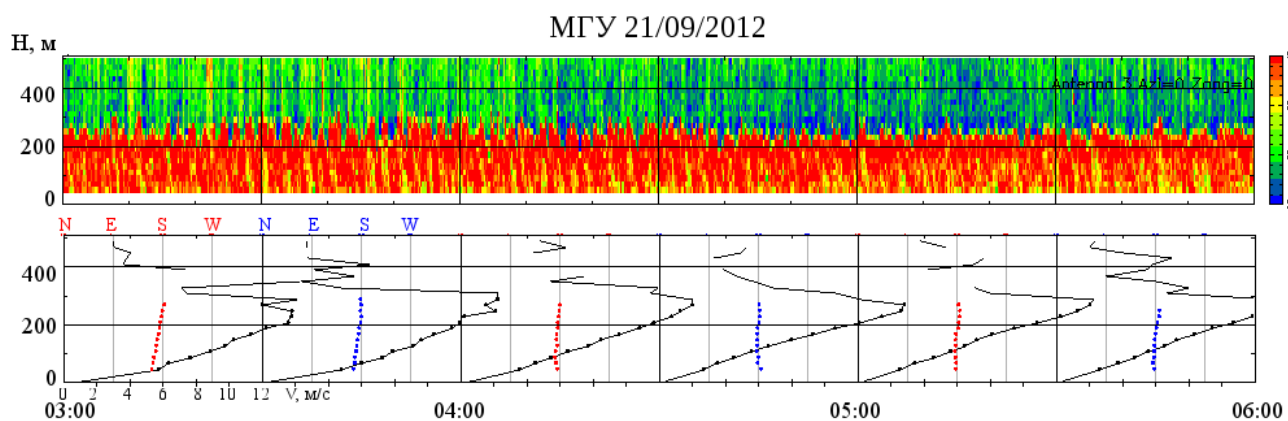
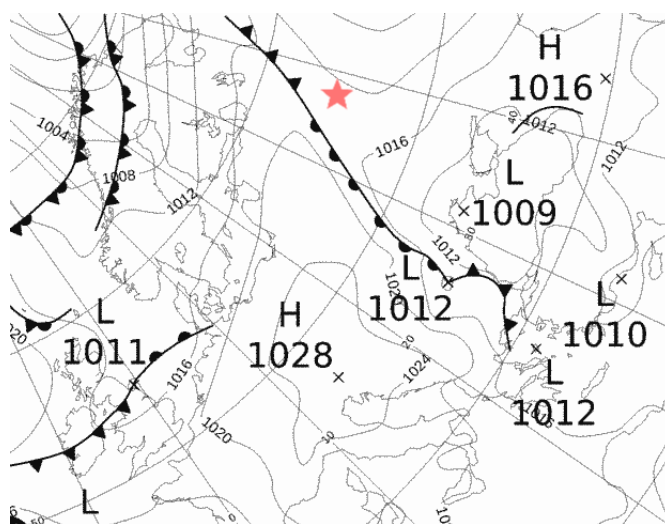


Рис. 3.15. Пример регистрации обширного цуга ВКГ (длительность порядка 15 часов) в условиях высокого градиента барического поля на границе циклона и антициклона, 28.09.2012. а) Сodarная эхограмма; б) синоптическая карта 00 UTC 28.09.2012. Обозначения как на Рис. 3.12.



(а) Содарная эхограмма



(б) Синоптическая карта

Рис. 3.16. Пример регистрации обширного цуга ВКГ (длительность порядка 10 часов) вблизи атмосферного фронта в седловине барического поля, 21.09.2012. а) Содарная эхограмма; б) синоптическая карта 00 UTC 21.09.2012. Обозначения как на Рис. 3.12.

3.4 ВКГ в Антарктике, в аридных и прибрежных регионах

3.4.1 Волны в антарктическом АПС

Содарные исследования волн над заснеженной поверхностью Антарктики проводились на финской станции Абоа, находящейся на слабо-наклонном леднике на Земле Королевы Мод в 100 км от побережья [68; 69], и на итальянско-французской станции Конкордия, находящейся на Куполе “Си” [89]. На Рис. 3.17 и 3.18 приведены примеры содарной визуализации волновой активности, наблюдавшейся в приземных и приподнятых инверсионных слоях в летние антарктические сезоны.

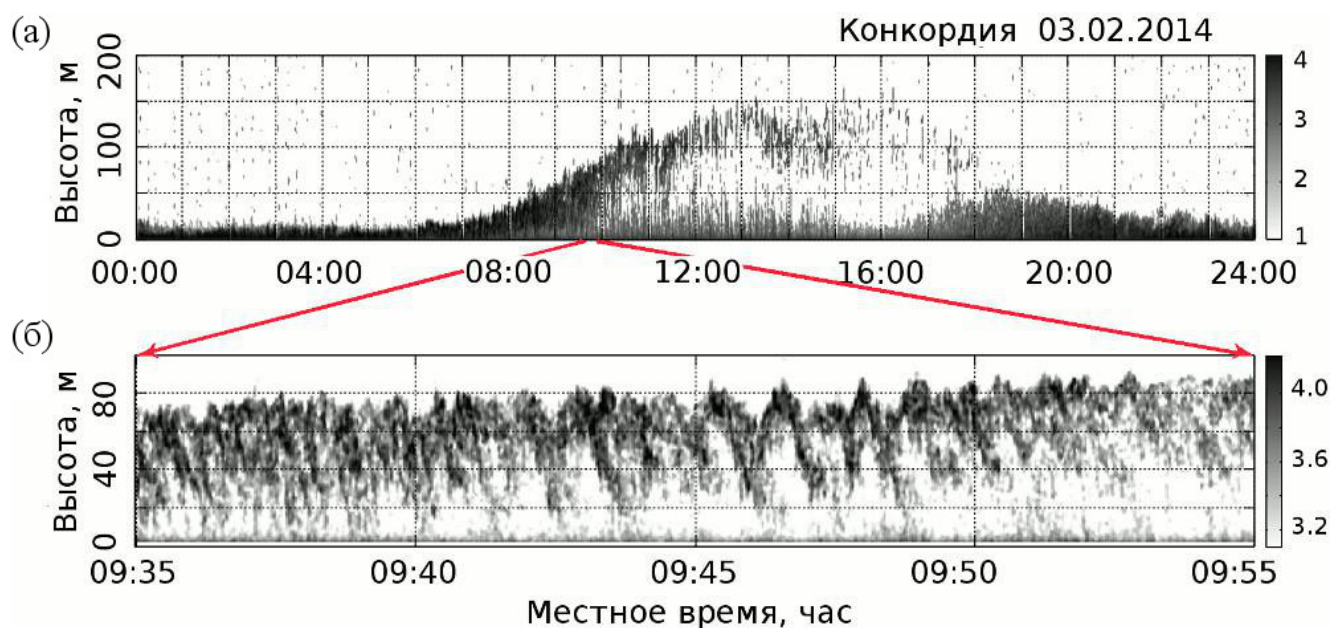


Рис. 3.17. Эхограмма содара высокого разрешения, научная станция Конкордия, 03.02.2014. а) - пример изменения мезомасштабной структуры турбулентности при утреннем переходе от тонкого слоя ночной приземной инверсии к неустойчивой стратификации. б) - отмеченный стрелками фрагмент эхограммы в увеличенном масштабе, демонстрирующий мелкие ВКГ в слое инверсии при его подъеме над конвективными термиками.

На Куполе “Си” кульминационная высота Солнца над горизонтом достаточно велика (около 38°), чтобы “подогреть” подстилающую поверхность.

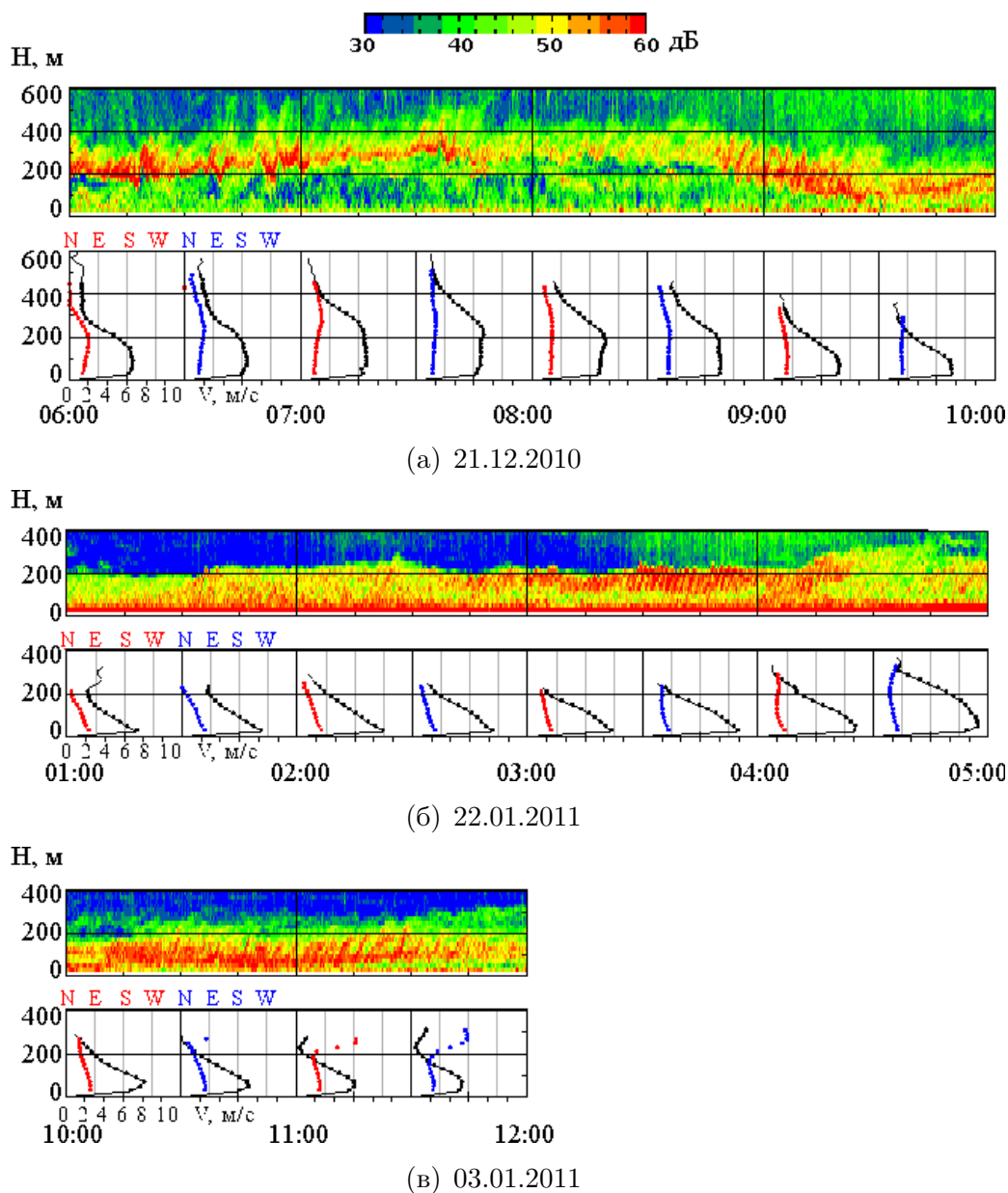


Рис. 3.18. Примеры ВКГ в верхней части кататических течений, зарегистрированных трёхкомпонентным частотно-кодированным минисодаром Латаи-ЗМ на финской станции Абоа летом 2010-2011 года. Под эхограммами указано местное время. Нижняя панель - осреднённые за 30 мин профили скорости и направления ветра по содарным данным.

В декабре-феврале 2014 г. в дневные часы при ясной погоде и температуре воздуха около -25°C над снежным покровом на станции Конкордия наблюдалась слабая конвекция, прикрытая приподнятым инверсионным слоем. Суточная смена стратификации видна на содарной эхограмме на Рис. 3.17(а), полученной с помощью минисодара с высотным разрешением 2 м и временным разрешением 1 с [21]. На увеличенном фрагменте эхограммы, Рис. 3.17(б), четко различимы волнообразные структуры типа волн Кельвина-Гельмгольца в форме наклонных полос с амплитудой $2A \approx 50$ м и периодом ≈ 50 с. Длина волны по грубой оценке с использованием гипотезы замороженности Тейлора составляет $\lambda \approx 250-350$ м.

На станции Абоа при безоблачной погоде обычно наблюдались катабатические течения, сопровождавшиеся возникновением ВКГ в верхней части течения, где скорость ветра уменьшается с высотой. На Рис. 3.18 показана эхограмма типичного цуга ВКГ и соответствующие профили скорости ветра. По этим данным были сделаны следующие оценки параметров волн для эпизода в окрестности 09:00 часов: длительность цуга - около получаса, длина цуга - порядка 10 км, амплитуда волн $2 \approx 200$ м, период ≈ 3 минуты, длина волны $\lambda = TV900$ м. Принципиальных отличий характера волн в АПС высоких широт и в АПС средних широт не обнаружено.

3.4.2 Волны в аридных и степных районах

Волновые структуры в АПС над аридными и степными районами изучались в ходе экспедиций в полупустынной зоне Калмыкии и в степи, на Цимлянской научной станции (ЦНС) ИФА. В экспериментах использовались различные модификации трехантенного многочастотного содара с разрешением от 2 с по времени и от 5 м по высоте.

С 19 по 30 июля 2016 года измерения проводились над пустынной ровной поверхностью на одном из песчаных выносов, окружённых степью, в 6 километрах от посёлка Нарын-Худук, республика Калмыкия. Измерения на ЦНС проводились в августе 2012, 2015 и 2016 гг. непрерывными сериями продолжительностью от 2 до 4 недель. Измерения проводились преимущественно в жаркую безоблачную погоду. В структуре АПС наблюдался выраженный суточный ход, с мощными инверсиями и струйными течениями в ночное время и интенсивным конвективным обменом в дневное время. Отличий в структуре АПС и характере ВКГ над песчаной поверхностью и над степью в условиях хорошей погоды не было выявлено.

Использование минисодаров высокого разрешения позволило регистрировать ВКГ в тонких слоях ночных инверсий, наблюдаемых при интенсивном выхолаживании над степной и песчаной поверхностью. В ряде экспедиций были проведены эксперименты по синхронной регистрации ВКГ с помощью содара и одноантенного минисодара высокого разрешения (3 с по времени и 5 м по высоте). При этом мини содар располагался на удалении от содара и основных приборов, а также строений и деревьев, что позволяло добиться максимальной чувствительности прибора и минимальной “мертвой зоны” из-за отсутствия отражений от препятствий. На Рис. 3.19 приведена фотография минисодара с автономным питанием, расположенного на удалении 400 м от основных приборов. На Рис. 3.20 приведен пример синхронной регистрации волн на эхограммах содара и минисодара. Волны, практически не различимые на эхограмме содара (Рис. 3.20(а)), четко визуализируются на эхограмме минисодара (Рис. 3.20(б,в)). Пример регистрации ВКГ в слое мелкой приземной инверсии приведен на Рис. 3.21. Период зарегистрированных волн составляет порядка 30 с, толщина волнового слоя - 50 м. Волны с такими параметрами не разрешаются стандартным содаром.



Рис. 3.19. Одноантенный минисодар высокого разрешения с автономным питанием, расположенный на удалении от препятствий и источников шума. ЦНС, 2016 г.

Волны регистрировались в течение 80% времени существования инверсий, при условии достаточной разрешающей способности прибора. В целом, статистика зарегистрированных гравитационно-сдвиговых волн в степной и аридной зоне не отличается от полученной при анализе многолетних измерений на ЗНС. Это означает, что орография равнинной местности, которую можно характеризовать как слабо-неоднородную, а также средняя температура воздуха, незначительно влияли на образование ночных ВКГ, и основной причиной возбуждения наблюдавшихся волн была сдвиговая неустойчивость в слое приземной, либо приподнятой инверсии [3].

3.4.3 Волны в АПС в прибрежных регионах

Эксперименты, направленные на исследование динамики и структуры АПС в прибрежной зоне, были проведены на базе Черноморского гидрофизического полигона РАН в поселке Кацивели. Трехкомпонентный многоча-

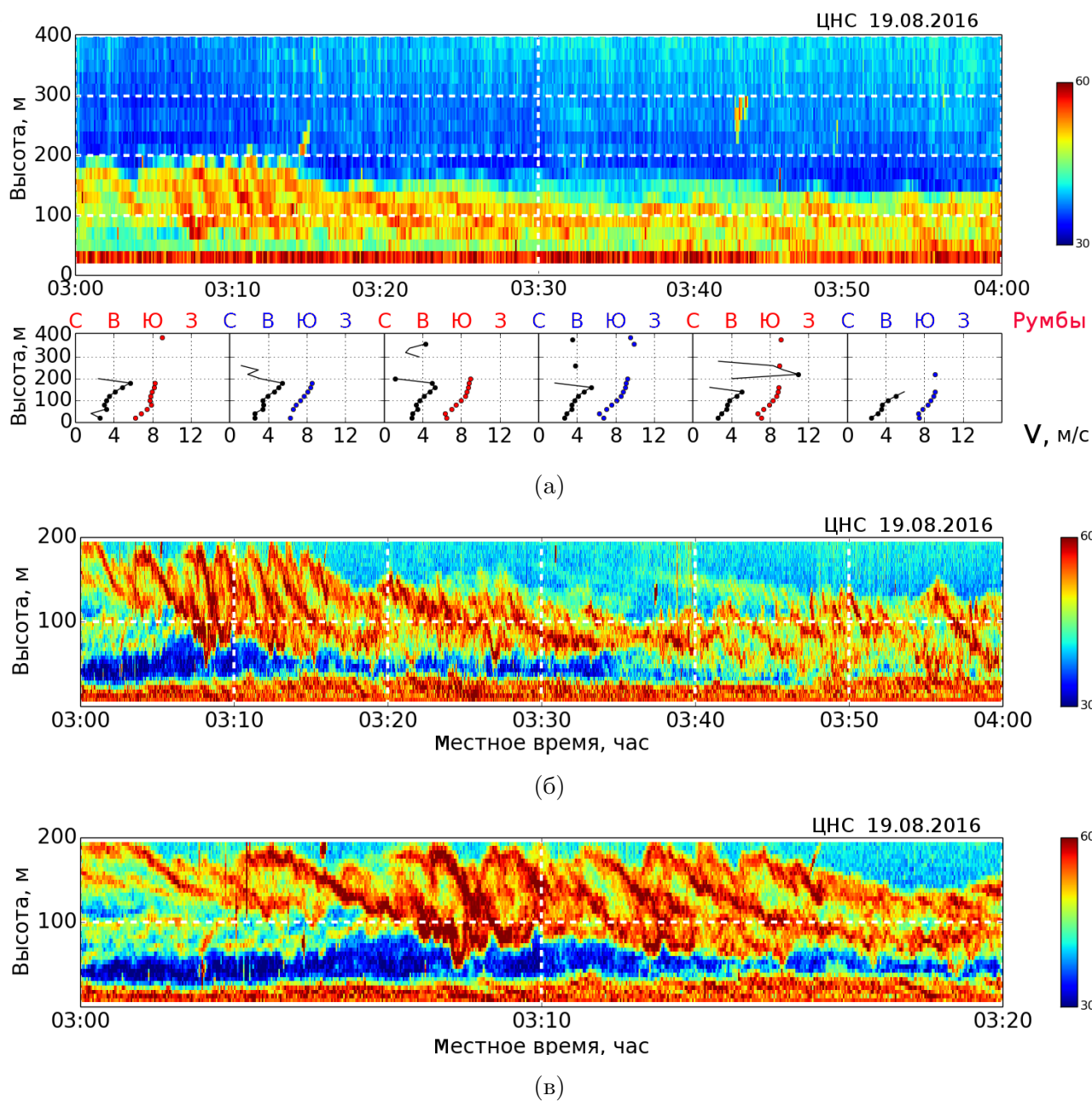


Рис. 3.20. ВКГ на синхронных эхограммах содара со стандартным разрешением (а) и минисодара (б), ЦНС, 19.08.2016. В нижней части панели (а) приведены профили скорости и направления ветра, осредненные за 10 мин. На панели (v) приведен фрагмент эхограммы (б) с растянутой шкалой времени, что позволяет лучше визуализировать внутреннюю структуру волновых образований.

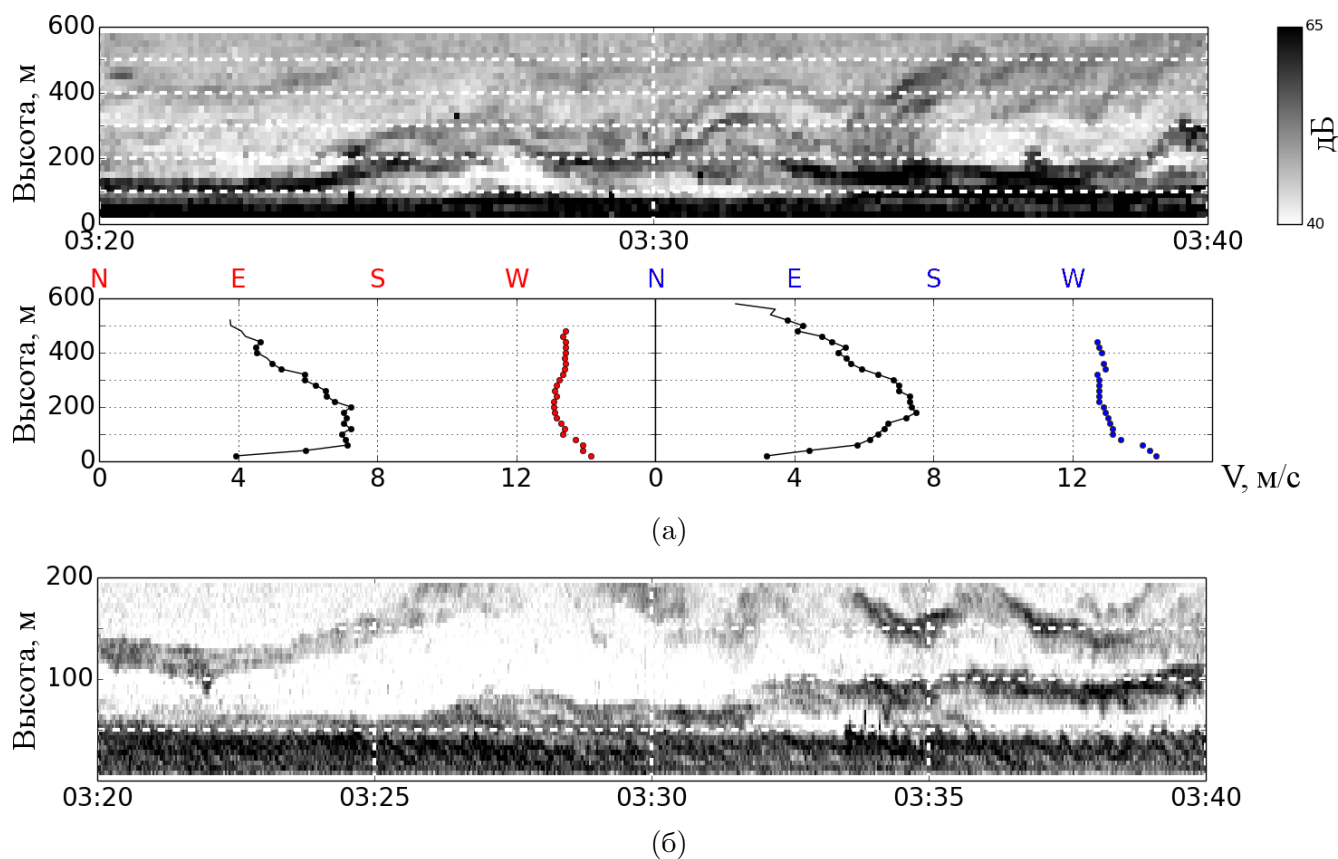


Рис. 3.21. ВКГ в мелком слое приземной инверсии на синхронных эхограммах содара со стандартным разрешением (а) и минисодара (б), ЦНС, 14.08.2016.

стотный содар работал в круглосуточном режиме в течение 10 дней в июне 2015 г. и в октябре 2016 г. на стационарной океанологической платформе, расположенной приблизительно в 500 метрах от береговой линии. В точке измерений наблюдалась сложная структура АПС, сильно зависящая от направления ветра и определяемая взаимодействием морского и наземного АПС, бризовыми циркуляциями, стоковыми ветрами и суточными вариациями. Пример эхограммы содара, расположенного на платформе, приведен на Рис. 3.22. Волновая активность была зарегистрирована содаром в 20% всего времени измерений, с преобладанием внутренних гравитационных волн типа волн плавучести, что, очевидно, связано с орографическими особенностями местности. ВКГ наблюдались в инверсионных слоях при наличии сдвигов ветра. В бризовых ячейках были зарегистрированы ВКГ различной формы одновременно в двух слоях: в нижней части бриза и в возвратном

течении. Пример регистрации такого эпизода приведен на Рис. 3.23. Разница в направлении ветра между нижней (до 100 м) и верхней частями течения составляет 100 градусов, сдвиг скорости ветра отрицателен в нижней части и положителен в верхней.

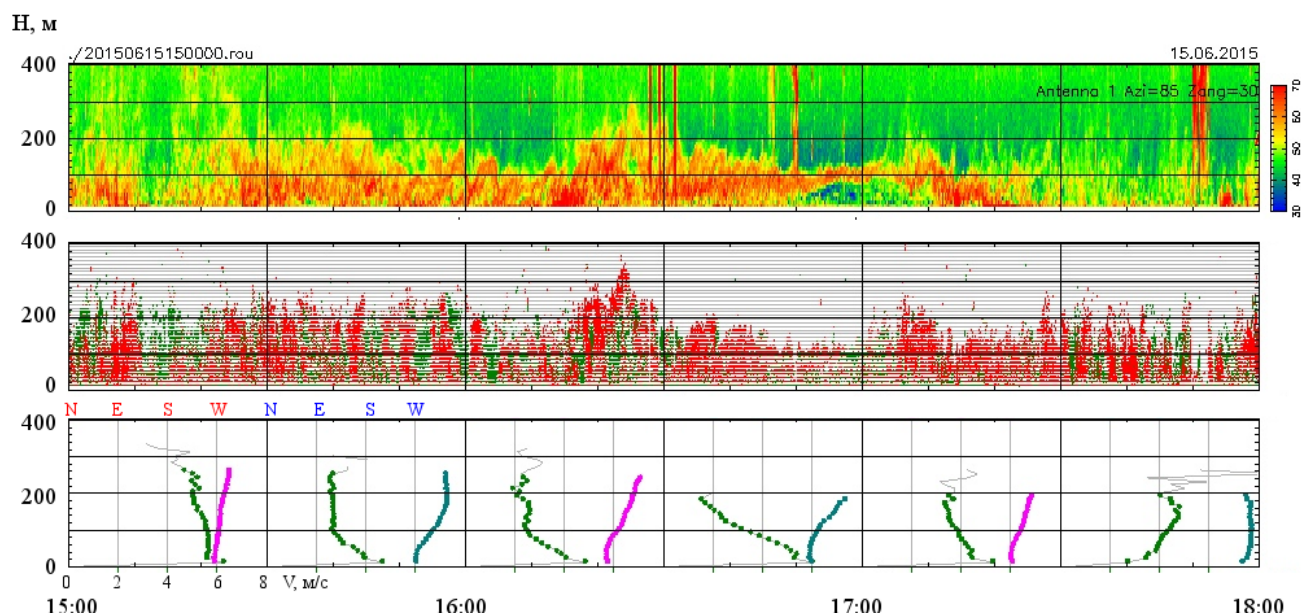


Рис. 3.22. Пример сложной структуры АПС над морем, включающей НСТ, конвекцию и волновые движения, Черноморский океанологический полигон, 13.06.2015.

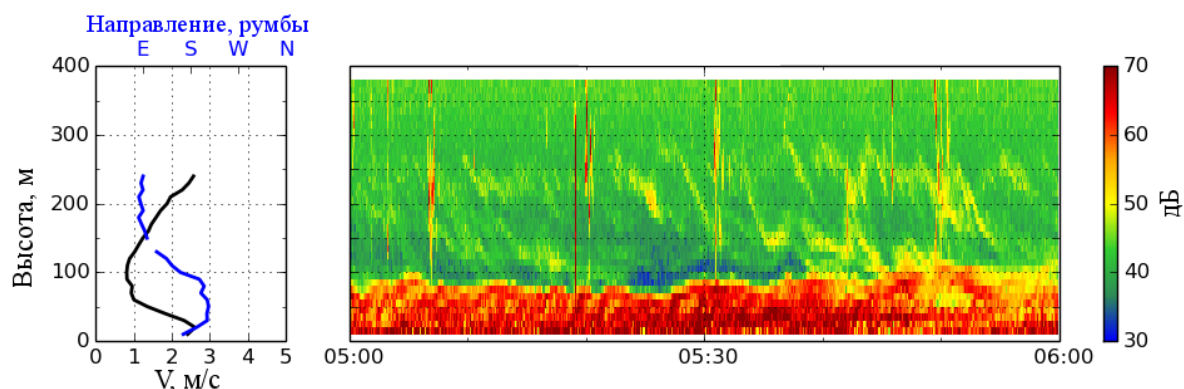


Рис. 3.23. Регистрация ВКГ в бризовой ячейке, Черноморский океанологический полигон, 13.06.2015. В слое от 0 до 100 м наблюдаются ВКГ в форме косы с наклоном полос вправо при отрицательном сдвиге ветра. В возвратном потоке бриза в слое 150–250 м наблюдаются полосы с наклоном влево при положительном сдвиге ветра.

3.5 Выводы из Главы 3

В результате длительного круглогодичного содарного мониторинга атмосферы на стационарных пунктах экспериментальной сети дистанционного зондирования, действующей в Московском регионе с 2005 года, а также проведения в 2007-2018 годах экспедиционных исследований, в ИФА им. А.М. Обухова РАН создан обширный архив экспериментальных данных о мезомасштабной структуре турбулентности и профилях скорости ветра в нижней части АПС. Визуальный анализ содарных эхограмм из обширного архива данных показал, что волновые структуры регистрируются почти в 80% времени существования устойчивой стратификации АПС. При этом в однородной и слабо-неоднородной равнинной местности в подавляющем большинстве случаев наблюдаются внутренние гравитационно-сдвиговые волны типа волн Кельвина-Гельмгольца. Используемые способы регистрации и описания ВКГ продемонстрировали распространенность этого явления, а так же большой диапазон временных и пространственных параметров наблюдаемых волн.

За период с 2008 по 2011 год на Звенигородской научной станции было зарегистрировано более 300 эпизодов ВКГ длительностью от 15 минут до нескольких часов. В основном, волны наблюдались в виде наклонных полос или “шнуров” на высоте 100–200 м, при сдвигах ветра 3–5 м/с на 100 м. Типичные параметры наблюдаемых волн: амплитуда (толщина слоя волновой активности) 60–400 м, пространственный период — 0,5–4 км, среднее соотношение между длиной волны и толщиной слоя $L/h = 9,2$. Получена статистика по частоте наблюдения ВКГ, периоду и длине наблюдаемых волн. Соотношение между длиной волны и толщиной слоя в целом соответствует теоретическим и модельным предсказаниям.

Была разработана концепция мезомасштабной сети мониторинга атмосферного пограничного слоя (АПС). Статистика пространственно-временных масштабов цугов ВКГ по данным синхронного содарного мониторинга АПС в 3-х стационарных пунктах дистанционного зондирования показала, что при регистрации гравитационно-сдвиговых волн в центре мегаполиса, волны всегда регистрируются и на периферии города, и в сельской местности, на расстоянии 50-ти км к западу от Москвы. При этом локальная структура АПС (высота и мощность инверсии) в этих трёх пунктах может заметно отличаться в связи с влиянием городского острова тепла. Нижняя оценка линейных размеров области, охваченной волновыми движениями, составляет 50 км. Одновременные эпизоды ВКГ в МГУ и на ЗНС (расстояние между пунктами ~ 50 км) были зарегистрированы в 80% от числа дней в году. Только в МГУ эпизоды ВКГ наблюдались в 5% дней, а только на ЗНС - в 12% дней. Лишь в 6% дней в году ни в одном из пунктов измерений не было зарегистрировано волновой активности. Межгодовая изменчивость этих соотношений мала. Статистика синхронных наблюдений показывает, что региональные синоптические условия играют ключевую роль для возникновения внутренних гравитационно-сдвиговых волн, и преобладают над локальными особенностями местности наблюдения. Таким образом, в случае регистрации ВКГ описанного типа на одном измерительном пункте, можно сделать вывод о наличии и характере волновой активности во всем регионе. Этот важный результат позволяет на основе статистики наблюдения на одном или нескольких пунктах дистанционного зондирования АПС провести оценку влияния наличия ВКГ на результаты численного регионального моделирования.

По результатам сопоставления синоптических карт с эхограммами для эпизодов волновой активности в Московском регионе показано, что наибо-

лее часто длительные пакеты ВКГ, охватывающие протяженный регион, образуются вблизи ложбин давления и атмосферных фронтов при больших градиентах приземного барического поля (т.е. при сильном геострофическом ветре).

Наблюдения и оценки параметров ВКГ в Антарктике, в степных, аридных и прибрежных районах не показали принципиальных отличий характера волн и их параметров в АПС в различных регионах. Показано, что волновая активность является неотъемлемым свойством устойчиво стратифицированных атмосферных слоев. При малооблачной и ясной погоде ВКГ наблюдаются повсеместно в летний сезон в тёмное время суток, а над заснеженной и ледовой поверхностью в зимний сезон - круглосуточно. В Антарктике ВКГ наблюдаются в верхней части кatabатических течений. В аридных и степных районах волны регистрировались в течение 80% времени существования инверсий, при условии достаточной разрешающей способности прибора. В целом, статистика зарегистрированных гравитационно-сдвиговых волн в степной и аридной зоне не отличается от полученной при анализе многолетних измерений на ЗНС. В прибрежных регионах в бризовых ячейках были зарегистрированы ВКГ различной формы одновременно в двух слоях: в нижней части бриза и в возвратном течении. Показано также, что идентифицируемость волн критически зависит от разрешающей способности регистрирующей аппаратуры. Стандартные содары регистрируют лишь наиболее четкие цуги крупных ВКГ. Применение минисодаров высокого разрешения по высоте (5–10 м) и времени (3–10 с) позволило идентифицировать мелкие волны с амплитудами от десяти метров и с периодами от десяти секунд, что увеличило количество регистрируемых пакетов ВКГ более чем в 10 раз.

ГЛАВА 4

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ВОЛН

КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Глава посвящена исследованию внутренней структуры волн Кельвина-Гельмгольца (ВКГ) в атмосферном пограничном слое (АПС). Приводится описание метода композитного анализа содарных данных, который позволяет выявлять регулярные структуры возмущений ветрового поля внутри волны на фоне флуктуаций мгновенных профилей ветра путём осреднения данных по отдельным валам пакета волн. Показано, что интегрирование осредненного поля отклонений скорости ветра позволяет качественно проанализировать траектории воздушных масс в волновом слое. Приводятся расчёты вектора скорости ветра внутри волны, показана слабая завихренность поля возмущений скорости и циркуляция воздушных масс. Приведена оценка скорости циркуляции воздуха в волновом слое.

4.1 Метод композитного анализа содарных данных

Тонкая структура порожденных волнами возмущений поля ветра представляет большой интерес для понимания процессов вертикального перемешивания в устойчивом АПС. Результаты первичной обработки содарных данных (мгновенные профили радиальных скоростей) дают мало информации о структуре поля ветра вследствие сильной изменчивости этих профилей и пространственных особенностей трехантенного зондирования. Время осреднения, необходимое для получения достаточно гладких профилей, сравнимо с периодом волн, поэтому стандартное временное осреднение искажает информацию о волновом процессе. Предложенная методика обработки содарных эхосигналов с помощью композитного анализа позволила получить

пространственно-временную структуру поля возмущений скорости ветра в ВКГ и показать связь завихренности поля с параметрами низкоуровневого струйного течения (НСТ).

4.1.1 Выбор данных для анализа внутренней структуры ВКГ

Для анализа структуры ВКГ использовались данные круглогодичных содарных измерений, проводившихся на Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы им. Обухова Российской академии наук в 2008–2010 гг. ЗНС (55.70 N, 36.78 E) расположена в слабо-неоднородной сельской местности в 45-ти километрах к западу от Москвы. Измерения проводились с помощью трёх-антенного моностатического доплеровского содара ЛАТАН-3 со следующими параметрами: временное разрешение - 20 с, вертикальное разрешение - 20 м, высотный диапазон зондирования - от 40 м до 200–500 м (в зависимости от стратификации уровня акустических шумов). Путём визуального анализа содарных эхограмм для анализа отбирались участки с четко различимыми структурами ВКГ. На Рис. 3.1 приведены примеры эпизодов, использованных для анализа, на которых видно существенное различие амплитуды и периодов волн в разные дни, а так же изменчивость параметров волн внутри пакета.

Данные для анализа структуры ВКГ в кatabатических течениях при долговременных инверсиях над снежной поверхностью были получены в ходе антарктической экспедиции на финской станции “Абоа” на слабо-наклонной однородной поверхности ледника, проведенной летом 2011 г. В ходе экспедиции в течение 2 недель осуществлялось круглосуточное содарное зондирование АПС с помощью минисодара ЛАТАН-3м с временным разрешением 10 с и вертикальным разрешением 20 м. Из архива данных для анализа были

отобраны эпизоды регистрации ВКГ в верхней части кататических течений. Примеры эхограмм с эпизодами ВКГ, использовавшимися для анализа, приведены на Рис. 3.18.

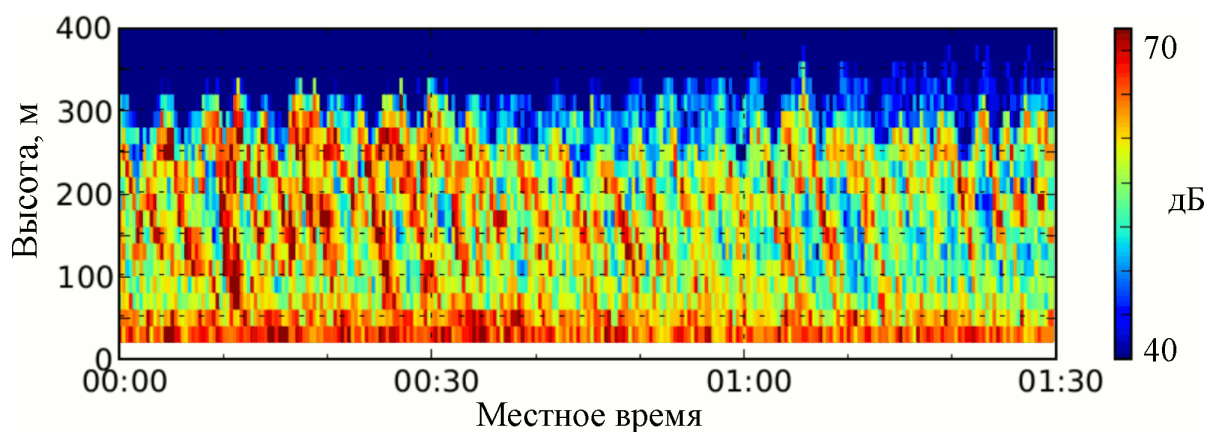
Большая часть наблюдаемых ВКГ имеют периоды меньше пяти минут, что делает затруднительным их регистрацию с помощью содаров. Также в большинстве случаев наблюдается большой разброс амплитуд и форм отдельных валов, например, амплитуда ВКГ при утреннем подъеме инверсии может увеличиваться от десятков до сотен метров за несколько часов. При отборе эпизодов для анализа были использованы следующие критерии:

- 1) волновой пакет содержит более пяти отчетливых валов схожей формы,
- 2) временной период валов больше 5 минут,
- 3) амплитуда валов в пакете меняется в пределах 20%,
- 4) амплитуда модуляции эхосигнала волновой структурой превышает 10 дБ.

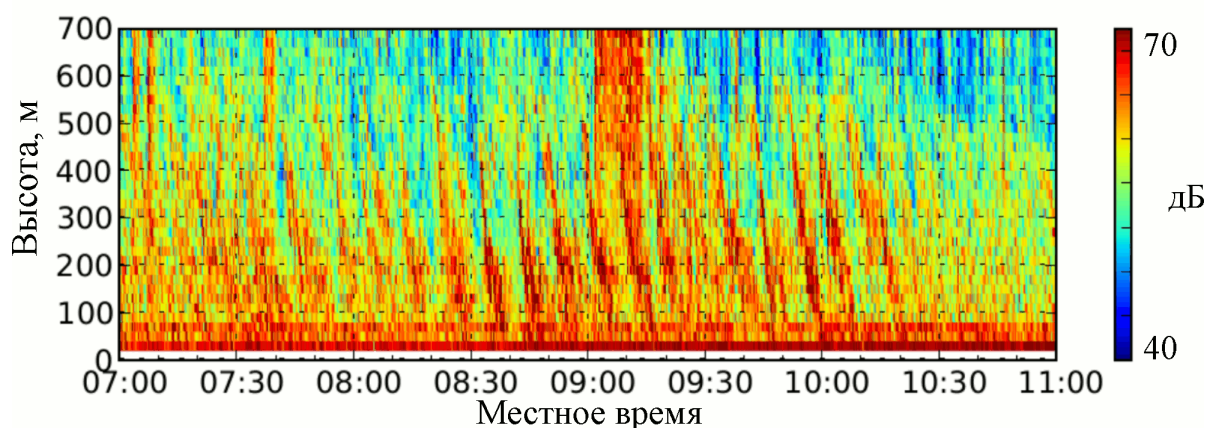
Примеры содарных эхограмм с регистрацией ВКГ, удовлетворяющие критериям 1–4, представлены на Рис. 4.1.

4.1.2 Применение метода композитного осреднения

Средства наземного дистанционного зондирования дают наглядную двухмерную картину волновых движений в поле интенсивности флуктуаций коэффициента преломления и/или скорости ветра, предоставляющую значительную информацию о волновой активности в атмосфере. Особый интерес для понимания процессов перемешивания в устойчивом АПС представляет тонкая структура ветровых возмущений, индуцируемых волновой активностью. Двухмерное поле возмущений скорости ветра, полученное для



(a) ЗНС, 29.01.2010



(б) ЗНС, 09.11.2010

Рис. 4.1. Примеры содарных эхограмм с регистрацией ВКГ, удовлетворяющие критериям отбора для композитного анализа.

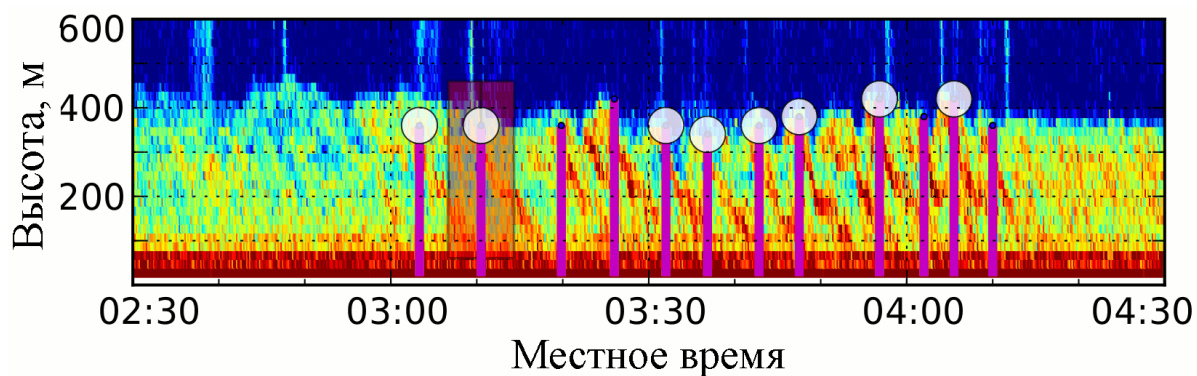
единичного эпизода волн Кельвина-Гельмгольца [82], выявило завихренную структуру поля скорости ветра. Информацию о наличии подобных вихревых возмущений невозможно получить на основе мгновенных профилей содарного зондирования (профили интенсивности возвращенного сигнала и радиальных скоростей для каждой из антенн) из-за высокой ошибки измерений и высокой изменчивости мгновенных профилей, как результат статистической неопределенности. В то же время временной интервал осреднения, необходимый для получения достаточно сглаженных профилей, как правило, превышает временной период наблюдаемых волн, и при осреднении теряется информация о волновых процессах. В связи с этим, для выявления

волновых возмущений поля ветра необходимо использовать специальные методы осреднения содарных данных.

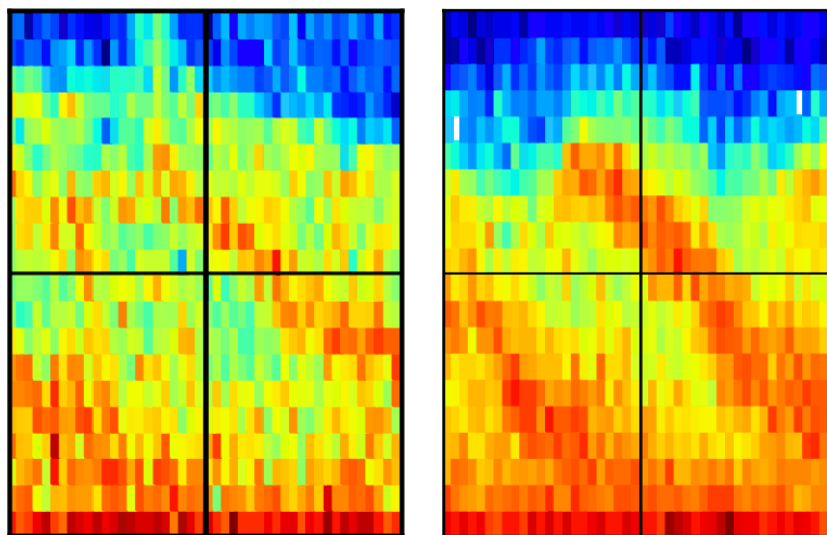
Для выявления пространственно-временного распределения скорости ветра в волновом слое был адаптирован хорошо известный метод композитного анализа, использованный, например, при исследовании конвективных структур [106]. Метод состоит в осреднении выборки с отдельными участками данных, содержащими интересующие события. Выборка производится по определенным критериям, и различные события нормируются по масштабам. Такое осреднение позволяет получить качественный вид структуры и формы события и подходит для изучения квазипериодических процессов.

Нормирование ВКГ по пространственно-временным масштабам не производилось: это потребовало бы передискретизации данных, так как разрешение содара сравнимо с масштабами волновых структур. Композитная форма строилась отдельно для каждого участка данных, и в осреднение включались близкие по масштабу и форме периоды волн. Выбор участков данных для осреднения и определение высоты и времени регистрации вала производилось вручную при визуальном анализе эхограмм. При осреднении использовались данные предварительной обработки эхосигналов: интенсивность эхосигнала и радиальная скорость. Подбор параметров осреднения (положение и количество участков данных в выборке, привязка участков к области вала, критерий отбраковки сигнал-шум) так же проводился вручную для каждого эпизода. В результате для каждого выбранного пакета были получены осредненные пространственно-временные распределения интенсивности эхосигнала и радиальных скоростей. Схема композитного анализа содарных данных представлена на Рис. 4.2.

Пример композитной структуры распределения компонент скорости ветра внутри слоя ВКГ в низкоуровневом струйном течении (НСТ) представлен



(a)



(б)

(в)

Рис. 4.2. Схема композитного анализа содарных данных. а) Ручной выбор валов и их положения на содарной эхограмме. Вертикальные линии соответствуют точкам привязки окна осреднения к отдельным валам пакета ВКГ. Кружками отмечены валы схожей формы, участвующие в осреднении. Выделенная прямоугольная область соответствует окну осреднения. б) Участок данных в окне осреднения, соответствующий выделенному участку на панели (а). в) Результат композитного осреднения выборки.

на Рис. 4.3. Цветовые представления распределений даются в координатах время-высота, соответствующих окну осреднения (приблизительно вмещающего один вал ВКГ). Ниже приводится интерпретация полученного распределения и примеры визуализации внутренней структуры поля ветра.

4.1.3 Интерпретация композитной структуры ВКГ

Типичный вид композитного пространственно-временного распределения вертикальной скорости w внутри единичного вала ВКГ представлена на Рис. 4.3(а,б). Левое изображение дает цветовое представление распределения скорости, на правом изображении серия графиков зависимости вертикальной скорости от времени наложена на композитную структуру распределения интенсивности эхосигнала. Значения вертикальной компоненты скорости на графиках осреднены для нескольких вертикальных уровней зондирования. Изображения демонстрируют корреляцию между распределениями эхосигнала, соответствующего интенсивности турбулентных пульсаций, и вертикальной скорости. Область с максимальными значениями скорости (восходящий поток) расположена на заднем склоне вала, область с минимальными значениями — на переднем склоне. Важно отметить, что такое распределение отличается от наблюдаемого при регистрации бегущих волн, в них фаза скорости опережает фазу смещения.

Композитная форма распределения горизонтальной скорости ветра u внутри волны может быть получена из композитных значений радиальных скоростей ветра для трех антенн. На Рис. 4.3(в) приведено цветовое представление композитной структуры возмущений скорости ветра Δu , полученной как отклонение от среднего композитного вертикального профиля

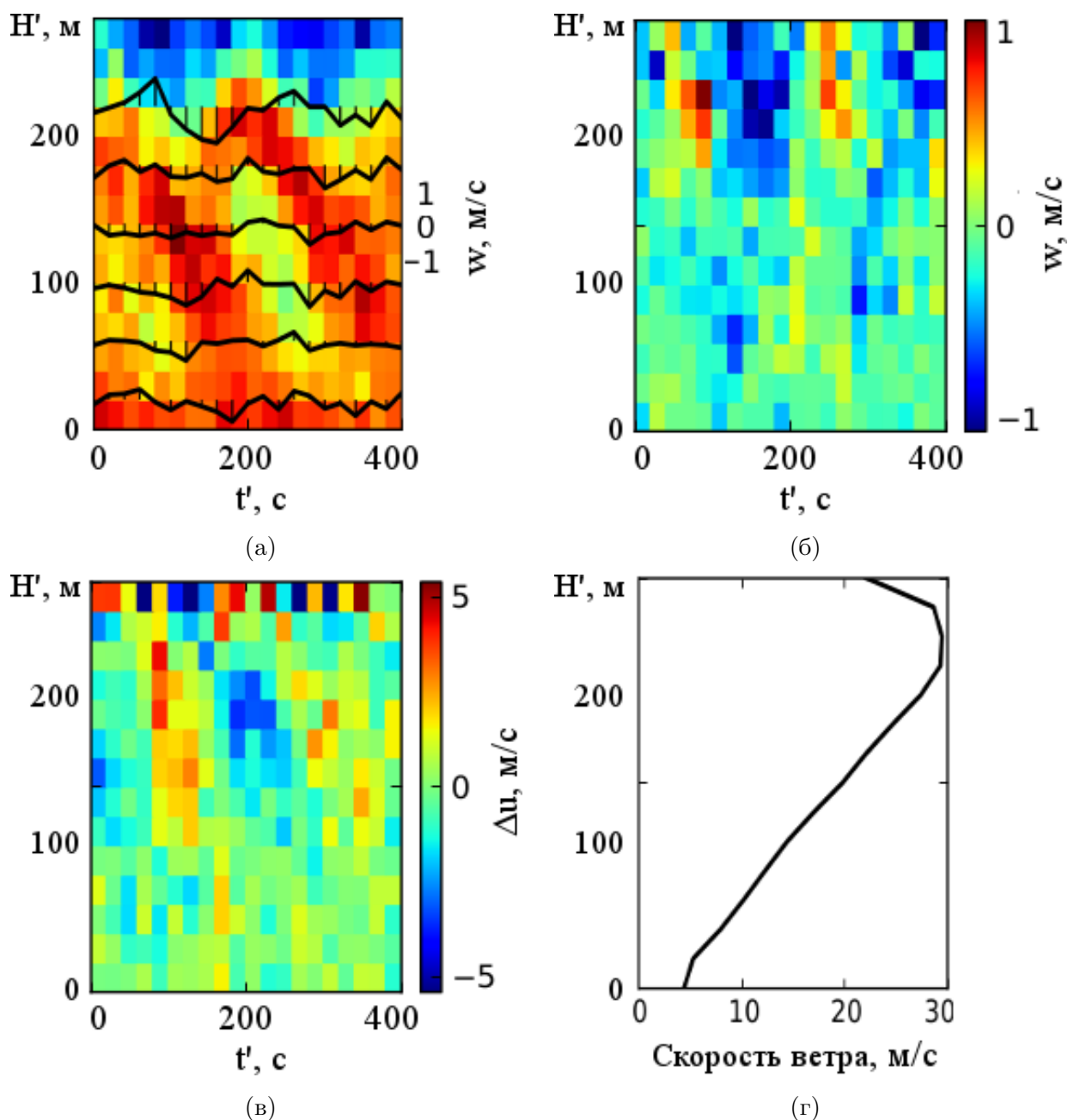


Рис. 4.3. Пример композитной структуры распределения компонент скорости ветра внутри слоя ВКГ в низкоуровневом струйном течении. а) цветное представление распределения вертикальной скорости ветра; б) серия графиков зависимости вертикальной скорости от времени наложенная на композитную структуру распределения интенсивности экосигнала; в) цветное представление композитной структуры возмущений горизонтальной компоненты скорости ветра Δu ; г) композитный вертикальный профиль скорости ветра. По координатам отложены относительное время t' и относительная высота H' для окна осреднения.

$\langle U \rangle(h)$. В поле возмущений скорости видна четкая структура валов, повторяющая структуру распределения интенсивности турбулентных пульсаций. Область максимального положительного отклонения от среднего значения совпадает с передним склоном вала ВКГ, максимального отрицательного — с задним склоном. На Рис. 4.3(г) приведен композитный вертикальный профиль горизонтальной скорости ветра, полученный осреднением всех профилей входящих в композитную выборку. Величина скорости в максимуме композитного профиля значительно превышает максимальную скорость, полученную осреднением по времени, что указывает на корреляцию между высотой валов и положением максимума НСТ, так как композитное осреднение проводится с привязкой к высоте каждого вала (Рис. 4.4).



Рис. 4.4. Сопоставление вертикальных профилей скорости ветра, полученных методом композитного осреднения (а) и осреднения по времени (б). ЗНС, 29.01.2010.

4.2 Структура возмущений ветрового поля внутри ВКГ

Для каждого эпизода было построено двухмерное векторное поле ветровых возмущений $(\Delta \mathbf{u} + \mathbf{w})$. Для адекватной визуализации направления потоков в волне при наложении векторного поля на композитную эхограмму в координатах время-высота, горизонтальная компонента векторов $\Delta \mathbf{u}$ масштабировалась с коэффициентом

$$k = dt/dh\bar{U},$$

где dt - временное разрешение содара, dh - вертикальное разрешение, \bar{U} - средняя скорость ветра для выборки. Благодаря такой визуализации ветровых возмущений можно оценивать взаимосвязь между направлениями потоков и пространственной турбулентной структурой ВКГ. Для некоторых случаев ВКГ в поле явно видна завихренность, совпадающая по масштабам с периодом волн и повторяющая особенности формы валов.

4.2.1 ВКГ в низкоуровневых струйных течениях над равниной

Примеры композитных векторных полей скорости ветра с выраженной завихренностью в слое ВКГ в НСТ приведены на Рис. 4.5 и 4.6. Такая завихренность характерна для неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, подобные структуры были продемонстрированы в лабораторных и численных экспериментах [100]. Форма завихренности находится в сильной зависимости от среднего профиля ветра. Структура поля скоростей в ВКГ при монотонном профиле ветра, когда максимум НСТ лежит выше волнового слоя, приведена на Рис. 4.5(б). Турбулентная структура имеет форму “косы”, в поле скоростей прослеживается завихрение, локализованное в пределах периода

ВКГ: скорость выше средней скорости потока на гребне волны и ниже у основания.

В случае низкоуровневого струйного течения с максимумом скорости, расположенным внутри волнового слоя, структура поля скоростей выглядит иначе. На Рис. 4.5(б) в векторном поле прослеживаются два завихрения противоположной направленности. В таких случаях валы ВКГ на эхограммах выглядят как серия наклонных полос. Структуры подобного вида также наблюдались в лабораторных и численных экспериментах по изучению неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в струйных потоках [86].

На Рис. 4.6 приведены другие примеры композитных форм и ветровых структур ВКГ для случаев, когда завихрения в поле композитной скорости смещены вверх в слое относительно турбулентных структур на эхограмме. При этом на эхограмме гребень волны не прослеживается и волновая структура в поле эхосигнала выглядит как наклонные полосы.

4.2.2 ВКГ в верхней части кatabатических течений над заснеженным склоном

В данных содарного зондирования с антарктической станции Абоа эпизоды ВКГ продолжительностью в несколько часов с различными параметрами наблюдаются в верхней части кatabатических течений, образующихся в статически устойчивой АПС над заснеженным склоном. Примеры композитных форм и структур ВКГ в кatabатических течениях приведены на Рис. 4.7. Форма и структура валов отличаются от ВКГ, часто наблюдаемых в НСТ в средних широтах. В композитном поле скорости ветра можно видеть завихренность с противоположным направлением, относительно вихрей низкоуровневых течений. В волне горизонтальная скорость ветра

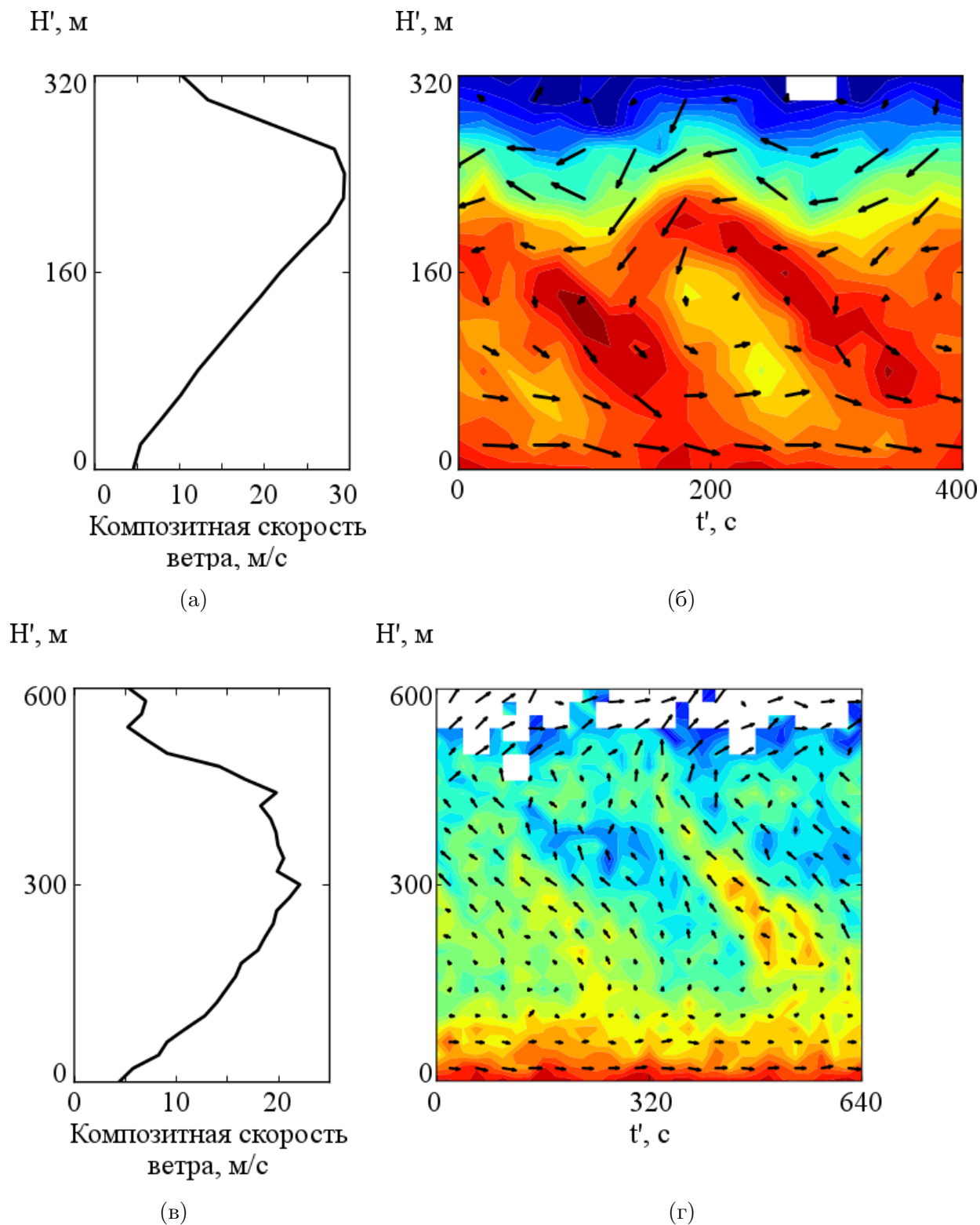
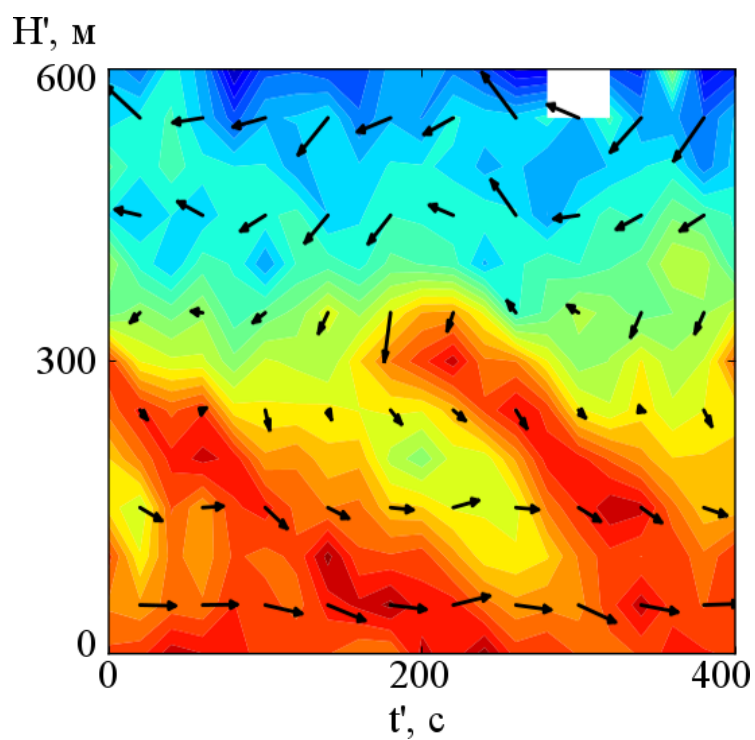
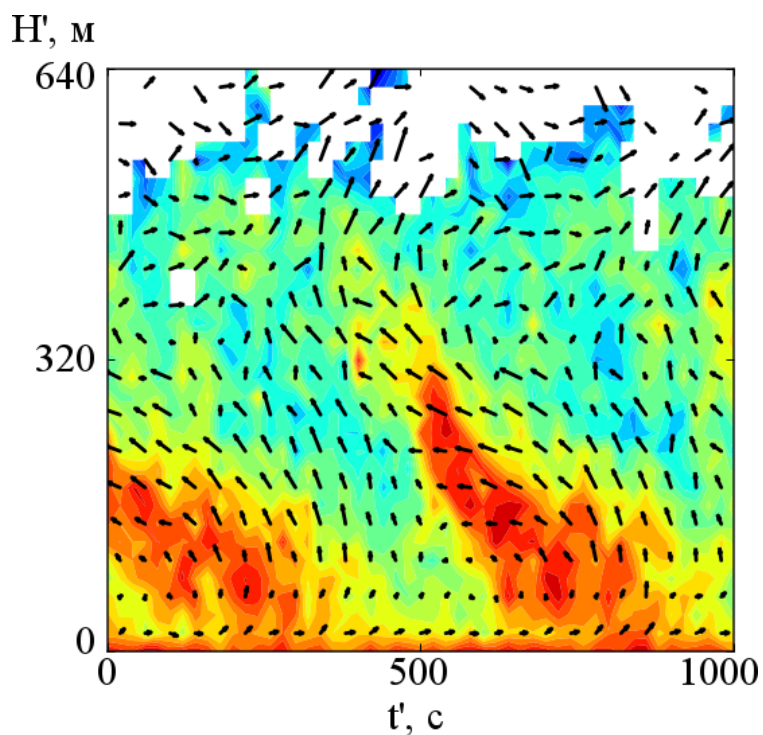


Рис. 4.5. Структура ветрового поля внутри ВКГ в НСТ. Слева - композитные профили скорости ветра, справа - двумерное поле направления ветровых возмущений, наложенное на композитную эхограмму в координатах время-высота. Вверху - ЗНС, 29.01.2010, внизу - ЗНС, 03.12.2008.



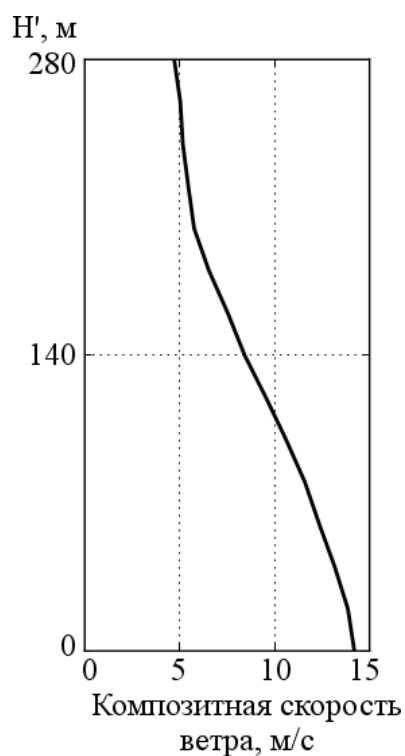
(a) ЗНС, 09.10.2010



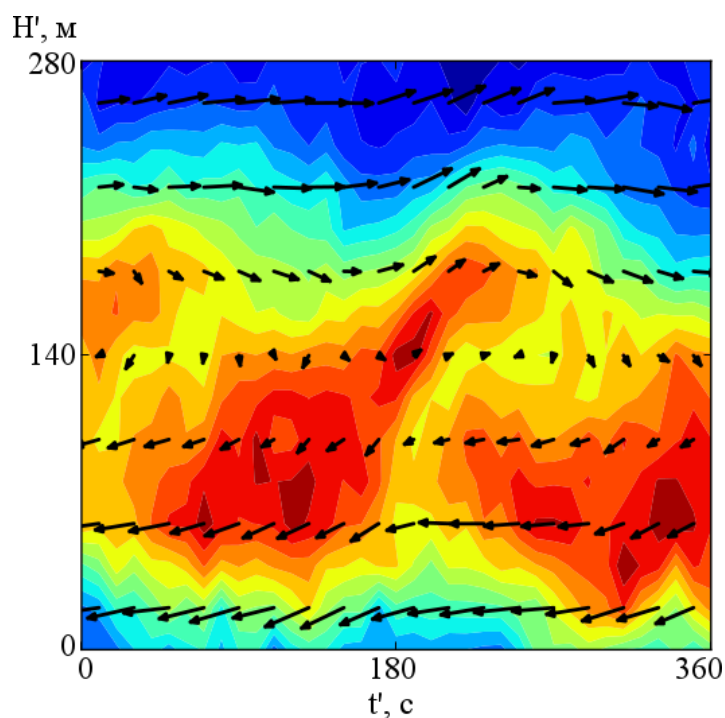
(б) ЗНС, 31.01.2010

Рис. 4.6. Структура ветрового поля внутри ВКГ в НСТ для случаев, когда завихрения в поле композитной скорости смещены вверх в слое относительно турбулентных структур на эхограмме.

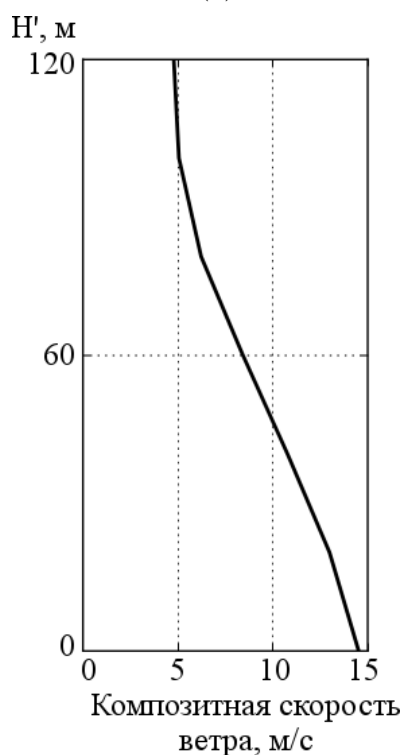
ниже средней скорости потока на гребне вала и выше у основания, а вихрь вращается по часовой стрелке в координатах $X-Z$, если ось X совпадает с направлением средней скорости ветра. Такая структура находится в соответствии с формой вертикального профиля скорости ветра, монотонно убывающей выше максимума кatabатического течения.



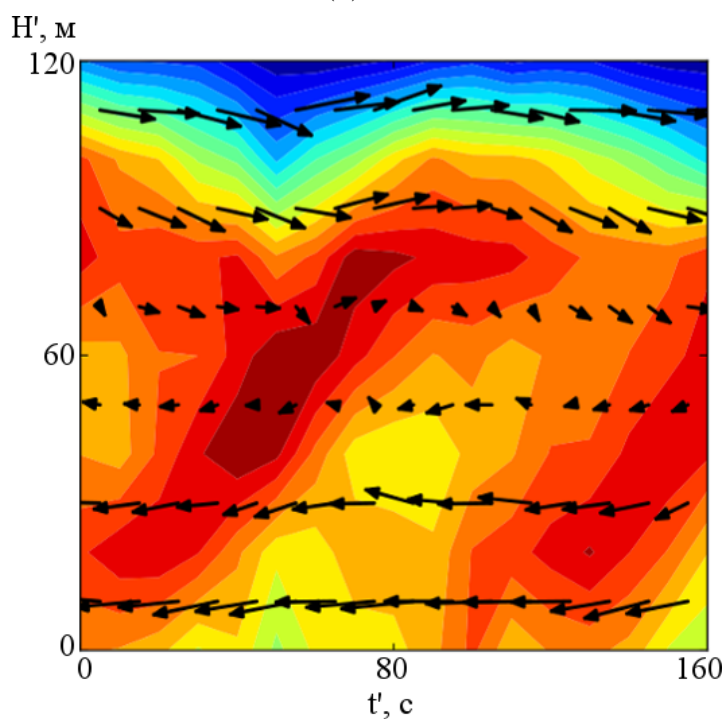
(a)



(б)



(в)



(г)

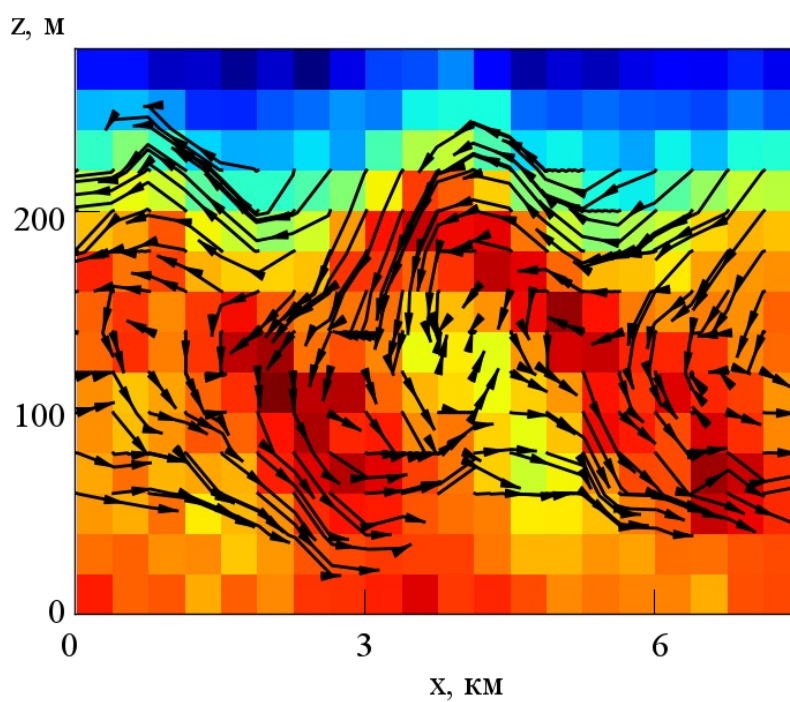
Рис. 4.7. Структура ветрового поля внутри ВКГ в верхней части катабатических течений. Слева — композитные профили скорости ветра, справа — двухмерное поле направления ветровых возмущений, наложенное на композитную эхограмму в координатах время-высота. а,б) Абоа, 21/12/2010; в,г) Абоа, 22/01/2011.

4.3 Пространственная динамическая структура ВКГ

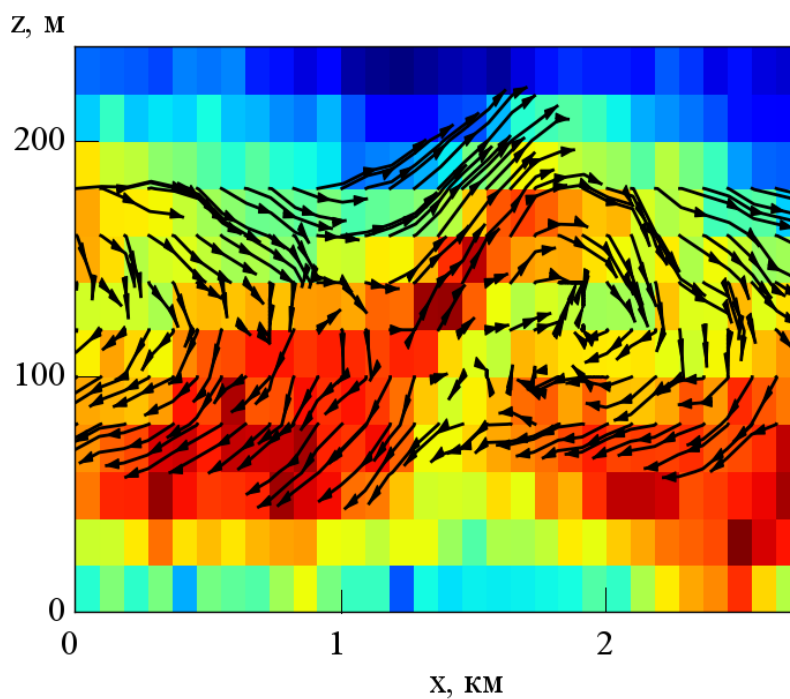
Завихренность ветрового поля в волновом слое можно служить объяснением устойчивости формы валов ВКГ при значительном времени существования в слое со сдвигом ветра (например, в эпизодах, приведенных в параграфе 3.2). В частности, динамическая устойчивость может достигаться в случае, когда ветровое поле представляет собой цепь вихрей, переносимых потоком без вертикального сдвига ветра. При этом сдвиг на вертикальных профилях скорости ветра, полученных в результате временного осреднения, объясняется суперпозицией среднего потока и вихревых возмущений. Такая картина согласуется с полученными в предыдущих пунктах векторными полями.

В рамках данного предположения можно перейти от временной развертки композитных полей к пространственной, путем замены $\Delta t \rightarrow \Delta x = \bar{U} \Delta t$, что позволяет методом численного интегрирования построить траектории частиц в вертикальном сечении потока в координатах, движущихся со средней скоростью потока. На Рис. 4.8 представлены построенные таким образом траектории, наложенные на композитное поле интенсивности эхосигнала для двух характерных эпизодов ВКГ в НСТ и кatabатическом течении.

На рисунках хорошо прослеживается завихренность траекторий и заметно хорошее согласование между формой траекторий и формой волновой структуры, визуализируемой распределением интенсивности эхосигнала. Разрешение содара, использованного при регистрации данных волновых пакетов, недостаточно для однозначной интерпретации результатов таких вычислений: для построения минутной траектории в этих примерах используются среднее от одного до трех значений композитной скорости ветра в соответствующих точках пространства. Однако полученные изображения



(a)



(б)

Рис. 4.8. Двухмерные траектории частиц в вертикальной плоскости в координатах X-Z. Время интегрирования для каждого трека - 2 мин, стрелки на траекториях отмечены через каждую минуту. а) ЗНС, 29.01.2010, б) Абоа, 21.12.2010.

могут служить качественной иллюстрацией структуры ветрового поля в слое ВКГ. Грубая оценка для периода вращения полученных вихрей составляет 30 мин. В случае незамкнутых траекторий этот период характеризует время вертикального переноса массы. Временной период регистрации валов на эхограмме содара при этом составляет порядка 3 мин, т. е. на порядок меньше.

4.4 Выводы из Главы 4

Метод композитного анализа содарных данных позволил выявить связь вихревой структуры ветрового поля со средним профилем ветра и отличия параметров и структуры ВКГ в низкоуровневых струйных течениях и в верхней части кatabатических течений над заснеженной поверхностью Антарктиды.

Разработанный метод композитного анализа позволил построить векторные поля возмущений скорости ветра внутри слоя ВКГ. В двумерных полях вектора возмущений скорости обнаружены вихревые структуры, типичные для неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Проведено исследование ВКГ, наблюдавшихся в кatabатических течениях в Антарктиде летом 2010–2011 года. Показана обратная завихренность поля скорости ветра в слое с монотонно убывающим профилем горизонтальной скорости ветра.

Структура ветрового поля, выявленная методом композитного анализа, допускает гипотезу об устойчивой динамической структуре ВКГ, представляющей собой медленно вращающиеся вихри (иногда не замкнутые) с типичными периодами порядка десятков минут, переносимые общим потоком. Масштабы и форма вихрей зависят от формы вертикальных профилей скорости ветра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы и следующие из них выводы:

- 1) Разработаны методы содарной регистрации и определения параметров волн Кельвина-Гельмольца (ВКГ), соответствующие разным режимам работы аппаратуры. Предложены критерии визуальной идентификации ВКГ на содарных эхограммах, показана зависимость количества обнаруженных волновых эпизодов от разрешающей способности аппаратуры.
- 2) Проведены долговременные (в течение 5-и лет) непрерывные измерения параметров атмосферного пограничного слоя на сети содарного мониторинга в Московском регионе, а также краткосрочные измерения в экспедициях в степных, аридных и прибрежных регионах. Обнаружено, что гравитационно-сдвиговые волны типа волн Кельвина-Гельмольца (ВКГ) являются наиболее распространенным типом волн в слабо неоднородной местности и повсеместно наблюдаются в низкоуровневых сдвиговых течениях при инверсиях.
- 3) Для повышения высотного и временного разрешения зондирования частично модифицирована аппаратура, а также алгоритмы управления режимом работы содара и первичной обработки данных. В результате этого на порядок увеличилось количество зарегистрированных эпизодов ВКГ в АПС за счет идентификации более мелких волн (с периодами около 1 мин).
- 4) Создан архив данных по зарегистрированным эпизодам ВКГ в Московском регионе с 2008 года и в ходе экспедиций в 2012–2016 годах, содержащий эхограммы, первичные данные, данные сопутствующих измерений и основные пространственно-временные параметры волн.

Данные этого архива могут быть использованы для дальнейших исследований.

- 5) Исследована статистика наблюдаемых пространственно-временных параметров ВКГ и характеристик сопутствующих метеорологических профилей по круглогодичным наблюдениям на ЗНС. За период с 2009 по 2011 год на Звенигородской научной станции было зарегистрировано по содарным эхограммам более 300 эпизодов крупных ВКГ. Длительность пакетов ВКГ составляла от 15 минут до нескольких часов. В основном, волны наблюдались в виде наклонных полос или “шнуров” на высоте 100–200 м, при сдвигах ветра $3\text{--}5\text{ с}^{-1}$ на 100 м. Типичные параметры наблюдаемых волн: толщина слоя волновой активности – 60–400 м, пространственный период — 0.5–4 км, среднее соотношение между длиной волны и толщиной слоя $L/h = 9,2$. Получены распределения частоты наблюдения ВКГ, периода и длины наблюдаемых волн. Полученное соотношение между длиной волны и толщиной слоя в целом соответствует модельным оценкам.
- 6) Получена статистика пространственно-временных масштабов цугов ВКГ по данным синхронного содарного мониторинга АПС в 3-х стационарных пунктах дистанционного зондирования в Москве и Московской области. Обнаружено, что при регистрации гравитационно-сдвиговых волн в центре мегаполиса, волны всегда регистрируются и на периферии города, и в сельской местности, на расстоянии 50-ти км к западу от Москвы. При этом локальная структура АПС (высота и мощность инверсии) в этих трёх пунктах может заметно отличаться в связи с влиянием городского острова тепла. Одновременные эпизоды ВКГ на периферии города и в сельской местности (на расстоянии 50 км) были зарегистрированы в 80% от числа дней в году. Статистика синхрон-

ных наблюдений показывает, что региональные синоптические условия играют ключевую роль для возникновения ВКГ, и преобладают над локальными особенностями местности наблюдения. Таким образом, в случае регистрации ВКГ описанного типа на одном измерительном пункте, можно сделать вывод о наличии и характере волновой активности во всем регионе.

- 7) Исследована связь частоты наблюдения ВКГ с синоптической ситуацией. Показано, что наиболее часто длительные эпизоды волновой активности, охватывающей протяженный регион, образуются вблизи ложбин давления и атмосферных фронтов при больших градиентах приземного барического поля (т.е. при сильном геострофическом ветре).
- 8) Разработан метод получения тонкой структуры ветрового поля в периодических турбулентных структурах по содарным данным на основе композитного анализа, который состоит в осреднении интенсивности вертикальной и горизонтальной компонент скорости ветра, измеренных внутри отдельных периодов ВКГ. Предложенная методика обработки содарных эхосигналов с помощью композитного анализа позволила получить пространственно-временную структуру поля скорости ветра в ВКГ и показать связь внутренней структуры с параметрами струйного течения.
- 9) Исследована внутренняя динамическая структура ВКГ, и её связь со средними профилями скорости ветра. По результатам композитного анализа построены векторные поля возмущений скорости ветра внутри слоя ВКГ. В двумерных полях вектора возмущений скорости обнаружены вихревые структуры, типичные для неустойчивости

Кельвина-Гельмгольца. Показано обратное направление завихренности поля скорости ветра в слое с монотонно убывающим профилем горизонтальной скорости ветра. Выявленная структура ветрового поля свидетельствует об устойчивой динамической структуре ВКГ, представляющей собой медленно вращающиеся вихри (иногда не замкнутые) с типичными периодами порядка нескольких десятков минут, переносимые общим потоком. Масштабы и форма вихрей зависят от формы вертикальных профилей скорости ветра.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю Маргарите Александровне Каллистратовой за выбор направления исследований, связанного с одним из красивейших явлений в гидродинамике, за полученный бесценный опыт, постоянное внимание и вдохновение; Сергею Николаевичу Куличкову за внимание и всестороннюю поддержку; Отто Гурамовичу Чхетиани за организацию интереснейших и плодотворных экспедиционных работ; Ростиславу Дмитриевичу Кузнецову за подробное объяснение тонкостей работы с содарной аппаратурой, постоянную техническую поддержку и ценные замечания; Дмитрию Дмитриевичу Кузнецову и Дарье Владимировне Зайцевой за помощь в организации измерений и обработке данных; Марии Дмитриевне Люлюкиной за поддержку, терпение и помощь в работе над текстом диссертации; коллективу ИФА им. А.М. Обухова РАН за теплую атмосферу и удовольствие от совместной работы.

Список литературы

1. *Васильев О., Воропаева О., Курбацкий А.* Турбулентное перемешивание в устойчиво стратифицированных течениях окружающей среды: современное состояние проблемы (обзор) // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. — 2011. — Т. 47, № 3. — С. 291—307.
2. *Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978.
3. *Зайцева Д.* [и др.]. Воздействие внутренних гравитационных волн на флуктуации метеорологических параметров атмосферного пограничного слоя // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 195—205.
4. *Каллистратова М. А.* Экспериментальное исследование рассеяния звуковых волн в атмосфере // ДАН СССР. — 1959. — Т. 125. — С. 69—72.
5. *Каллистратова М., Петенко И., Шурыгин Е.* Содарные исследования поля скорости ветра в нижней тропосфере // Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 451.
6. *Каллистратова М.* [и др.]. Содарное зондирование атмосферного пограничного слоя (обзор работ ИФА им. А.М.Обухова РАН) // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. — 2018. — Т. 54, № 3. — С. 283—300. — DOI: 10.7868/S0003351518030054.
7. *Камардин А., Одинцов С., Скороходов А.* Идентификация внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое по данным содара // Оптика атмосферы и океана. — 2014. — Т. 27, № 9. — С. 812—818.

8. *Красненко Н. П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. — Томск : Институт оптического мониторинга СО РАН, 2001. — С. 278.
9. *Кузнецов Р.* Акустический локатор ЛАТАН-3 для исследований атмосферного пограничного слоя // Оптика атмосферы и океана. — 2007. — Т. 20, № 8. — С. 749—753.
10. *Курбацкая Л., Курбацкий А.* Вихревые коэффициенты переноса импульса и тепла в верхней тропосфере и нижней стратосфере: численное исследование // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2014. — Т. 4, № 1.
11. *Лайтхилл Д.* Волны в жидкостях. — М.: Мир, 1981.
12. *Люлюкин В.* [и др.]. Внутренние гравитационно-сдвиговые волны в атмосферном пограничном слое по данным акустической локации // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2015. — Т. 51, № 2. — С. 218—218.
13. *Обухов А. М.* О рассеянии звука в турбулентном потоке // ДАН СССР. — 1941. — Т. 30. — С. 611—614.
14. *Одинцов С.* Особенности движений нижнего слоя атмосферы при прохождении внутренних гравитационных волн // Оптика атмосф. и океана. — 2002. — Т. 15, № 12. — С. 1131.
15. *Романова Н., Якушкин И.* О гамильтоновом описании сдвиговых и гравитационно-сдвиговых волн в идеальной несжимаемой жидкости // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 579—590.
16. *Скорер Р.* Аэрогидродинамика окружающей среды: Пер. с англ. — Мир, 1980.

17. *Степаняни Ю., Фабрикант А.* Распространение волн в сдвиговых потоках // Современные проблемы физики. М.: Физматлит. — 1996.
18. *Татарский В. И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. — М. : Наука, 1967. — С. 548.
19. *Хоменко Г., Панина Н.* Влияние горизонтальных сдвигов ветра на внутренние волны в струйных течениях // Труды ЦАО. — 1977.
20. *Шакина Н.* Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. — Гидрометеиздат, 1990.
21. *Argentini S.* [et al.]. Use of a high-resolution sodar to study surface-layer turbulence at night // Boundary Layer Meteorology. — 2011. — Vol. 143. — P. 2011.
22. *Baklanov A., Mahura A., Sokhi R.* Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models. — Springer Science & Business Media, 2011.
23. *Banakh V., Smalikho I.* Lidar observations of atmospheric internal waves in the boundary layer of the atmosphere on the coast of Lake Baikal // Atmospheric Measurement Techniques. — 2016. — Vol. 9, no. 10. — P. 5239–5248.
24. *Banakh V. A., Smalikho I. N.* Lidar Studies of Wind Turbulence in the Stable Atmospheric Boundary Layer // Remote Sens. — 2018. — Vol. 10, no. 8. — P. 1219.
25. *Beran D. W., Hooke W. H., Clifford S. F.* Acoustic echo-sounding techniques and their application to gravity-wave, turbulence, and stability studies // Boundary Layer Meteorology. — 1973. — Vol. 4. — P. 133–153.

26. *Blumen W.* [et al.]. Turbulence statistics of a Kelvin–Helmholtz billow event observed in the night-time boundary layer during the Cooperative Atmosphere–Surface Exchange Study field program // Dynamics of Atmospheres and Oceans. — 2001. — Vol. 34, no. 2–4. — P. 189–204.
27. *Caughey S. J., Reading C. J.* An observation of waves and turbulence in the earth’s boundary layer // Boundary Layer Meteorology. — 1975. — Vol. 9. — P. 279–296.
28. *Chapman D., Browning K. A.* Radar observations of wind-shear splitting within evolving atmospheric Kelvin-Helmholtz billows // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. — 1997. — Vol. 123. — P. 1433–1439.
29. *Coulter R. L., Kallistratova M. A.* The role of acoustic sounding in a high-technology era // Meteorol. Atmos. Phys. — 1999. — Vol. 71. — P. 3–13.
30. *Cronenwett W., Walker G., Inman R.* Acoustic sounding of meteorological phenomena in the planetary boundary layer // Journal of Applied Meteorology. — 1972. — Vol. 11. — P. 1351–1358.
31. *Cushman-Roisin B.* Kelvin-Helmholtz instability as a boundary-value problem // Env. Flu. Mech. — 2005. — Vol. 5. — P. 507–525.
32. *Cushman-Roisin B., Beckers J.-M.* Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects. Vol. 101. — Academic press, 2011.
33. *Cuxart J.* [et al.]. Stable atmospheric boundary-layer experiment in Spain (SABLES 98): A report // Boundary Layer Meteorology. — 2000. — Vol. 96. — P. 337–370.

34. *DeBaas A. F., Driedonks A. G. M.* Internal gravity waves in a stably stratified boundary layer // *Boundary Layer Meteorology*. — 1985. — Vol. 31. — P. 303–323.
35. *DeSilva I.* [et al.]. Evolution of Kelvin-Helmholtz billows in nature and laboratory // *Earth Planet. Sci. Lett.* — 1996. — Vol. 143. — P. 217–231.
36. *Drazin P. G.* The Stability of a Shear Layer in an Unbounded Heterogeneous Inviscid Fluid // *J. Fluid Mech.* — 1958. — Vol. 4. — P. 214–224.
37. *Drazin P. G., Howard L. N.* The instability to long waves of unbounded parallel inviscid flow // *J. Fluid Mech.* — 1962. — Vol. 14. — 257–283.
38. *Ellrod G. P., Knox J. A.* Improvements to an Operational Clear-Air Turbulence Diagnostic Index by Addition of a Divergence Trend Term // *Wea. Forecasting*. — 2010. — Vol. 25. — P. 789–798.
39. *Emmanuel C.* Richardson number profiles through shear instability wave regions observed in the lower planetary boundary layer // *Boundary Layer Meteorology*. — 1973. — Vol. 5, no. 1/2. — P. 19–27.
40. *Emmanuel C. B.* [et al.]. Observations of Helmholtz waves in the lower atmosphere with an acoustic sounder // *Journal of Atmospheric Sciences*. — 1972. — Vol. 29, no. 5. — P. 886–892.
41. *Eymard L., Weill A.* A study of gravity waves in the planetary boundary layer by acoustic sounding // *Boundary Layer Meteorology*. — 1979. — Vol. 17. — P. 231–245.
42. *Feliks Y., Tziperman E., Farrell B.* Non-normal growth of Kelvin-Helmholtz eddies in a sea breeze // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* — 2014. — Vol. 140. — P. 2147–2157.

43. *Fernando H. J. S., Weil J. C.* Whither the stable boundary layer? // Bull. Amer. Meteorol. Soc. — 2010. — Vol. 91. — P. 1475–1484.
44. *Fritts D. C., Wang L., Werne J. A.* Gravity wave-fine structure interactions. Part I: Influences of fine structure form and orientation on flow evolution and instability // Journal of Atmospheric Sciences. — 2013. — Vol. 70. — P. 3710–3734.
45. *Fritts D. C.* [et al.]. Layering accompanying turbulence generation due to shear instability and gravity-wave breaking // J. Geophys. Res. — 2003. — Vol. 108, no. 8. — P. 8452.
46. *Fua D.* [et al.]. An Analysis of Wave-Turbulence Interaction // Journal of Atmospheric Sciences. — 1982. — Vol. 39. — P. 2450–2463.
47. *Fukao S.* [et al.]. Extensive studies of large-amplitude Kelvin-Helmholtz billows in the lower atmosphere with VHF middle and upper atmosphere radar // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. — 2011. — Vol. 137. — P. 1019–1041.
48. *Galperin B., Sukoriansky S., Anderson P. S.* On the critical Richardson number in stably stratified turbulence // Atmospheric Science Letters. — 2007. — Vol. 8, no. 3. — P. 65–69.
49. *Gilman G., Coxhead H., Willis F.* Reflection of sound signals in the troposphere // The Journal of the Acoustical Society of America. — 1946. — Vol. 18, no. 2. — P. 274–283.
50. *Goldstein S.* On the stability of superposed streams of fluids of different densities // Proc. R. Soc. Lond. A, 132(820). — 1931. — P. 524–548.
51. *Gossard E. E., Richter J. H., Jensen D. R.* Effect of wind shear on atmospheric wave instabilities revealed by FM/CW radar observations // Boundary Layer Meteorology. — 1973. — Vol. 4. — P. 113–131.

52. *Hall F. F.* Acoustic remote sensing of temperature and velocity structure in the atmosphere // Proceedings of NATO Advanced Study Institute, Statistical Methods and Instrumentation in Radio Meteorology. — April, 1971. — P. 167–180.
53. *Helmholtz H. V.* On discontinuous movements of fluids // Philos. Mag. — 1868. — Vol. 36. — P. 337–346.
54. *Holtslag A. A. M.* [et al.]. Stable atmospheric boundary layers and diurnal cycles: challenges for weather and climate models // Bull. Amer. Meteorol. Soc. — 2013. — Vol. 94, no. 11. — P. 1691–1706.
55. *Hooke W., Hall F., Gossard E.* Observed generation of an atmospheric gravity wave by shear instability in the mean flow of the planetary boundary layer // Boundary Layer Meteorology. — 1973. — Vol. 5, no. 1/2. — P. 29–41.
56. *Howard L. N.* Note on a paper of John W. Miles // Journal of Fluid Mechanics. — 1961. — Vol. 10, no. 4. — P. 509–512.
57. *Hunt J., Kaimal J., Gaynor J.* Some observations of turbulence structure in stable layers // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. — 1985. — Vol. 111, no. 469. — P. 793–815.
58. *Kallistratova M. A.* Acoustic and radioacoustic remote sensing studies in CIS (Former USSR) // Int. J. Remote Sensing. — 1994. — Vol. 1994, no. 15. — P. 251–266.
59. *Kallistratova M. A.* Investigation of low-level-jets over rural and urban areas using two sodars // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2008. — Vol. 1, no. 1. — P. 012040.

60. *Kallistratova M. A., Petenko I. V.* Aspect sensitivity of sound backscattering in the atmospheric boundary layer // *Appl. Phys. B.* — 1993. — Vol. 57. — P. 41–48.
61. *Kallistratova M. A., Kouznetsov R. D.* A note on sodar return signals in the stable atmospheric boundary layer // *Meteorologische Zeitschrift.* — 2009. — Vol. 18, no. 3. — P. 297–307.
62. *Kaplan M. L.* [et al.]. Characterizing the severe turbulence environments associated with commercial aviation accidents. Part 1: A 44-case study synoptic observational analyses // *Meteorology and Atmospheric Physics.* — 2005. — Vol. 88. — P. 129–152.
63. *Kelley N. D.* [et al.]. Impact of Coherent Turbulence on Wind Turbine Aeroelastic Response and Its Simulation : Preprint / National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO. — 2005. — NREL/CP-500-38074.
64. *Kelvin L.* Hydrokinetic solutions and observations // *Philos. Mag.* — 1871. — Vol. 42. — P. 362–377.
65. *Knox J. A.* Dynamical Meteorology | Inertial Instability. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences.* — 2015. — pp. 334-342.
66. *Knox J. A.* Possible Mechanisms of Clear-Air Turbulence in Strongly Anticyclonic Flows // *Mon. Wea. Rev.* — 1997. — Vol. 125. — P. 1251–1259.
67. *Kouznetsov R. D.* Multi-frequency sodar with high temporal resolution // *Meteorologische Zeitschrift.* — 2009. — Vol. 18, no. 2. — P. 169–173.

68. *Kouznetsov R. D., Tisler P., Vihma T.* Multiple-point sodar observations of structures in the ABL over slightly sloped glacier in Antarctica in 2014-2015 summer // Presentation at 15th EMS Annual Meeting. — Sofia, Bulgaria, 09/2015.
69. *Kouznetsov R. D.* [et al.]. Evidence of very shallow summertime katabatic flows in Dronning Maud Land, Antarctica // *J. Appl. Meteor. Climatol.* — 2013. — Vol. 52. — P. 164–168.
70. *Lapworth A.* Observations of the site dependency of the morning wind and the role of gravity waves in the transitions // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* — 2015. — Vol. 141, no. 686. — P. 27–36. — DOI: 10.1002/qj.2340.
71. *Lawrence G. A., Browand F. K., Redekopp L. G.* The stability of a sheared density interface // *Phys. Fluids A.* — 1991. — Vol. 3. — P. 2360–2370.
72. *Little C. G.* Acoustic methods for the remote probing of the lower atmosphere // *Proceedings of the IEEE.* — 1969. — Vol. 57, no. 4. — P. 571–578.
73. *Liu X.* [et al.]. Kelvin-Helmholtz billows and their effects on mean state during gravity wave propagation // *Ann. Geophys.* — 2009. — Vol. 27. — P. 2789–2798.
74. *Mashayek A., Peltier W. R.* Shear-induced mixing in geophysical flows: does the route to turbulence matter to its efficiency? // *Journal of Fluid Mechanics.* — 2013. — Vol. 725. — P. 216–261.
75. *McAllister L. G.* [et al.]. Acoustic sounding – a new approach to the study of atmospheric structure // *Proc. IEEE.* Vol. 57. — 1969. — P. 579–587.
76. *Miles J. W.* On the generation of surface waves by shear flows. Part 3. Kelvin-Helmholtz instability // *Journal of Fluid Mechanics.* — 1959. — Vol. 6, no. 4. — P. 583–598.

77. *Miles J. W., Howard L. N.* Note on a heterogeneous shear flow // J. Fluid Mech. — 1964. — Vol. 20. — P. 331–336.
78. *Muñoz-Esparza D.* [et al.]. Bridging the Transition from Mesoscale to Microscale Turbulence in Numerical Weather Prediction Models // Boundary Layer Meteorology. — 2014. — Vol. 153. — P. 409–440.
79. *Muschinski A.* Local and global statistics of clear-air Doppler radar signals // Radio Science. — 2004. — Vol. 39, RS1008. — P. 23.
80. *Na J. S., Jin E. K., Lee J. S.* Investigation of Kelvin-Helmholtz instability in the stable boundary layer using large eddy simulation // J. Geophys. Res. — 2014. — Vol. 119. — P. 7876–7888.
81. *Nappo C. J.* An introduction to atmospheric gravity waves. — Academic press, 2013.
82. *Newsom R. K., Banta R. M.* Shear-flow instability in the stable nocturnal boundary layer as observed by Doppler lidar during CASES-99 // Journal of Atmospheric Sciences. — 2003. — Vol. 30. — P. 16–33.
83. *Odintsov S. L.* Analysis of microstructure of short-period internal gravity waves // Proceed. 11th Int. Sympos. Acoustic Remote Sensing. — Rome, Italy, 06/2002. — P. 271–274.
84. *Optis M., Monahan A., Bosveld F. C.* Limitations and breakdown of Monin-Obukhov similarity theory for wind profile extrapolation under stable stratification // Wind Energy. — 2016. — Vol. 2016, no. 19. — P. 1053–1054.
85. *Ottersten H., Hardy K. R., Little C. G.* Radar and sodar probing of wave and turbulence in statically stable clear-air layers // Boundary Layer Meteorology. — 1973. — Vol. 4. — P. 47–89.

86. *Patterson M. D.* [et al.]. Time-dependent mixing in stratified Kelvin-Helmholtz billows: Experimental observations // *Geophysical research letters*. — 2006. — Vol. 33, no. 15.
87. *Peltier W. R., Caulfield C. P.* Mixing efficiency in stratified shear flows // *Annu. Rev. Fluid Mech.* — 2003. — Vol. 35. — P. 135–167.
88. *Penner I.* [et al.]. Detection of aerosol plumes from associated gas flaring by laser sensing // *21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. Vol. 9680. — International Society for Optics, Photonics. 2015. — P. 96804D.
89. *Petenko I.* [et al.]. Wavelike Structures in the Turbulent Layer During the Morning Development of Convection at Dome C, Antarctica // *Boundary Layer Meteorology*. — 2016. — Vol. 161, no. 2. — P. 289–307. — DOI: 10.1007/s10546-016-0173-6.
90. *Plougonven R., Zhang F.* Internal Gravity Waves From Atmospheric Jets and Fronts // *Rev. Geophys.* — 2014. — Vol. 52. — DOI: 10.1002/2012RG000419.
91. *Román-Cascón C.* [et al.]. Interactions among drainage flows, gravity waves and turbulence: a BLLAST case study // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2015. — Vol. 15, no. 15. — P. 9031–9047.
92. *Sandu I.* [et al.]. Why is it so difficult to represent stably stratified conditions in numerical weather prediction models? // *J. Adv. Model. Earth Syst.* — 2013. — Vol. 5. — P. 117–133. — DOI: 10.1002/jame.20013.
93. *Savijärvi H.* High-resolution simulations of the night-time stable boundary layer over snow // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* — 2013. — Vol. 140. — P. 1121–1128.

94. *Shapiro A., Fedorovich E.* A boundary-layer scaling for turbulent katabatic flow // *Boundary Layer Meteorology*. — 2014. — Vol. 153. — P. 1–17.
95. *Staqet C., Sommeria J.* Internal gravity waves: From instabilities to turbulence // *Annual Review of Fluid Mechanics*. — 2002. — Vol. 34. — P. 559–593.
96. *Stull R. B.* An introduction to *Boundary Layer Meteorology*. — Kluwer Acad. Publish., 1988. — P. 666.
97. *Sun J.* [et al.]. Review of wave-turbulence interactions in the stable atmospheric boundary layer // *Rev. Geophys.* — 2015. — Vol. 53. — DOI: 10.1002/2015RG000487.
98. *Sun J.* [et al.]. Turbulence regimes and turbulence intermittency in the stable boundary layer during CASES-99 // *Journal of Atmospheric Sciences*. — 2012. — Vol. 69. — P. 338–351.
99. *Taylor G. I.* Effect of variation in density on the stability of superposed streams of fluid // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. — 1931. — Vol. 132, no. 820. — P. 499–523.
100. *Thorpe S. A.* Experiments on instability and turbulence in a stratified shear flow // *J. Fluid Mech.* — 1973. — Vol. 61. — P. 731–751.
101. *Thorpe S. A.* Transitional phenomena and the development of turbulence in stratified fluid: a review // *J. Geophys. Res.* — 1987. — Vol. 92. — P. 5231–5248.
102. *Tyndall J.* *Sound* 3rd // Appleton, New York. — 1875.
103. *Udina M.* [et al.]. Model simulation of gravity waves triggered by a density current // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* — 2013. — Vol. 139. — P. 701–714.

104. *Venkatesh T. N., Mathew J., Nanjundiah R. S.* Secondary instability as a possible mechanism for clear-air turbulence: a case study // *Meteorology and Atmospheric Physics*. — 2014. — Vol. 126. — P. 139–160.
105. *Werne J. A., Fritts D. C.* Turbulence and mixing in a stratified shear layer: 3D K-H simulations at $Re=24,000$ // *Phys. Chem. Earth*. — 2001. — Vol. 26. — P. 263–268.
106. *Williams A., Hacker J.* The composite shape and structure of coherent eddies in the convective boundary layer // *Boundary-Layer Meteorology*. — 1992. — Vol. 61, no. 3. — P. 213–245.
107. *Wyngaard J. C.* *Turbulence in the Atmosphere*. — Cambridge University Press, 2010.

Список иллюстраций

1.1.	Примеры фотографий валов Кельвина-Гельмгольца на верхней границе облаков	17
1.2.	Схематические изображения волн Кельвина-Гельмгольца, наблюдаемых на временных развертках эхосигнала при дистанционном зондировании атмосферы	18
1.3.	Визуализация ВКГ на радарных и содарных эхограммах	24
1.4.	Примеры визуализации ВКГ на эхограммах, полученных с помощью сканирующего доплеровского лидара и сканирующего импульсного радара высокого разрешения	25
2.1.	Общий вид теоретических индикатрис рассеяния на температурных и ветровых флуктуациях.	32
2.2.	Колмогоровский спектр температурных флуктуаций.	34
2.3.	Звуковая сирена Тиндаля	36
2.4.	Изображение термических потоков, полученное МакАллистером	36
2.5.	Блок-схема трехкомпонентного моностатического содара	38
2.6.	Схема цикла зондирования содара в координатах высота-время .	40
2.7.	Пример визуализации содарных данных	44
2.8.	Типы волновых структур, регистрируемых содаром	46
2.9.	Модернизация программ обработки содарных данных для исследования ВКГ	47
2.10.	Содар и минисодар в процессе сборки	48
2.11.	Содарные измерения в экспедиционных условиях	51
3.1.	Визуализация ВКГ содаром ЛАТАН-3	56
3.2.	Распределение по месяцам суммарной длительности регистрации ВКГ	57
3.3.	Распределение периодов валов ВКГ	58
3.4.	Зависимость пространственного периода L внутренних гравитационно-сдвиговых волн от толщины слоя волновой активности h	60
3.5.	Распределение суммарной длительности наблюдения ВКГ при различных вертикальных сдвигах скорости ветра в НСТ	61
3.6.	Мезомасштабная сеть содарного мониторинга АПС в Московской области	63

3.7. Пример синхронной регистрации ВКГ на содарных эхограммах в трех пунктах сети зондирования АПС	65
3.8. Локальные различия при синхронном наблюдении ВКГ на пунктах ИФА и МГУ, 05.07.2012	67
3.9. Локальные различия при синхронном наблюдении ВКГ на пунктах ИФА и МГУ, 28.08.2012	68
3.10. Локальные различия при синхронном наблюдении ВКГ на пунктах МГУ и ЗНС	69
3.11. Существенные различия в структуре АПС на пунктах МГУ и ЗНС	70
3.12. Мелкая приземная инверсия с плохо разрешаемой структурой при антициклоне	72
3.13. ВКГ в поднимающемся инверсионном слое при антициклоне . . .	73
3.14. Пример регистрации ВКГ большой амплитуды вблизи атмосферных фронтов	74
3.15. Пример регистрации обширного цуга ВКГ на границе циклона и антициклона	76
3.16. Пример регистрации обширного цуга ВКГ вблизи атмосферного фронта	77
3.17. Эхограмма содара высокого разрешения, научная станция Конкордия	78
3.18. Примеры ВКГ в верхней части кататических течений	79
3.19. Минисодар высокого разрешения, расположенный на удалении от препятствий и источников шума	82
3.20. ВКГ на синхронных эхограммах содара со стандартным разрешением и минисодара, ЦНС, 19.08.2016	83
3.21. ВКГ в мелком слое приземной инверсии на синхронных эхограммах содара и минисодара, ЦНС, 14.08.2016	84
3.22. Пример сложной структуры АПС над морем	85
3.23. Регистрация ВКГ в бризовой ячейке	85
4.1. Примеры содарных эхограмм с регистрацией ВКГ, удовлетворяющие критериям отбора для композитного анализа. .	92
4.2. Схема композитного анализа содарных данных	94
4.3. Пример композитной структуры распределения компонент скорости ветра внутри слоя ВКГ в низкоуровневом струйном течении	96
4.4. Сопоставление вертикальных профилей скорости ветра, полученных методом композитного осреднения и осреднения по времени	97
4.5. Структура ветрового поля внутри ВКГ в НСТ	100

- 4.6. Структура ветрового поля внутри ВКГ в НСТ для случаев, когда завихрения в поле композитной скорости смещены вверх в слое относительно турбулентных структуре 101
- 4.7. Структура ветрового поля внутри ВКГ в верхней части кatabатических течений 103
- 4.8. Двухмерные траектории частиц в вертикальной плоскости в координатах X-Z 105

Список таблиц

1.1. Экспериментальные данные о волнах Кельвина-Гельмгольца в АПС	22
2.1. Перечень модификаций содара ЛАТАН-3	49
2.2. Системные параметры содара ЛАТАН-3	49
3.1. Количество дней с эпизодами ВКГ в МГУ и на ЗНС	66