

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

На правах рукописи



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

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2018

Работа выполнена в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Научный
руководитель: доктор физико-математических наук
профессор М.А. Каллистратова

Официальные
оппоненты: Рубинштейн Константин Григорьевич
доктор физико-математических наук
заведующий лабораторией моделирования
общей циркуляции атмосферы и климата
ФГБУ "Гидрометцентр России"

Степаненко Виктор Михайлович
кандидат физико-математических наук
ведущий научный сотрудник
лаборатории суперкомпьютерного моделирования
природно-климатических процессов
МГУ им. М.В. Ломоносова

Ведущая
организация: Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
Российской академии наук» (ИПФ РАН)
г. Нижний Новгород

Защита состоится «31» января 2019 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании
Диссертационного совета К 002.096.01 при Институте физики атмосферы
им. А.М. Обухова РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА им. А.М. Обухова
РАН.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
учреждения, просьба направлять по адресу: г. Москва, Пыжевский пер.,
д.3, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.096.01.

Автореферат разослан « » ноября 2018 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета
Д 002.096.01
канд. геогр. наук



Краснокутская Л.Д.

Общая характеристика работы

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 со стратификацией АПС. Способность сонаров наглядно визуализировать форму волн позволяет отличать гравитационно-сдвиговые волны, образующиеся в низкоуровневых струйных течениях (НСТ) 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 аэронавигации. 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, 5; 7; 10]. 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 замороженной 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 замороженным 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, 1; 9]. 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 также 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.

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.

Содержание работы

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. Приведена краткая история исследований, современное состояние проблемы, актуальные направления и нерешенные научные задачи. Существование в нижней

тропосфере мезомасштабных волнообразных структур с длинами волн от сотни метров до нескольких километров было известно ещё в позапрошлом веке по наблюдениям облаков необычной формы. Лабораторные исследования сдвиговых течений в двухслойных жидкостях, которые были начаты в 1970 годах [13], продемонстрировали возникновение и обрушение ВКГ, формы которых хорошо согласуются как с наблюдаемыми в облаках волнообразными структурами, так и с результатами численного моделирования [11]. С развитием техники зондирования, позволяющей с высоким разрешением визуализировать мезомасштабные турбулентные образования, волнообразные структуры стали эпизодически обнаруживаться в поле интенсивности эхо-сигнала. Позднее подобные структуры были обнаружены и в поле ветра при доплеровских радарных и лидарных измерениях.

В атмосферном пограничном слое дистанционных наблюдений ВКГ немного, и практически нет климатологической информации, до настоящего времени опубликовано лишь около полутора десятков свидетельств обнаружения цугов 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.

В последнее десятилетие большое внимание уделяется вопросам взаимодействия волн в АПС с турбулентностью [8]. Это связано, прежде всего, с развитием крупномасштабного регионального моделирования АПС, которое нуждается в адекватной параметризации обменных процессов при устойчивой стратификации [12].

Во второй главе описаны используемая аппаратура и методики измерений и обработки данных. В качестве основного инструмента в исследованиях использовались доплеровские акустические моностатические локаторы (содары). В главе

приводится история развития методов акустического зондирования, описываются физические основы действия содаров, рассматриваются вопросы интерпретации эхограмм и основные количественные соотношения. Действие содаров основано на рассеянии звука мелко-масштабными температурными неоднородностями [2—4]. 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. Для обратного рассеяния звука в турбулентной атмосфере (рассеяния на угол 180) эффективное сечение связано со структурной характеристикой следующим выражением:

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

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

Компонента скорости ветра, параллельная направлению зондирования, таким образом выражается следующей формулой:

$$V_r = \frac{c}{2f_0} (f_0 - f). \quad (3)$$

При исследовании волновой активности главным достоинством содаров (как и других локационных средств зондирования) является их способность визуализировать мезомасштабную структуру АПС, что позволяет 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 [6].

Приводится описание используемой аппаратуры, ключевые особенности используемой схемы измерений и обработки данных. На Рис. 1 приведены примеры регистрации ВКГ на содарных эхограммах.

В главе приведены описания стационарных измерительных пунктов сети содарного мониторинга в Московской области, данные которой были использованы при получении климатологических характеристик и оценке пространственно-временных масштабов ВКГ. Приводится описание экспедиционных содарных измерений в Антарктиде, в степных, аридных и прибрежных регионах.

В третьей главе приводятся климатологические данные о параметрах ВКГ. Приведена статистика повторяемости и основных параметров ВКГ в Московской области (по архивным содарным данным за 2009-2011 гг.). Рассчитаны 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. Распределения параметров ВКГ на Звенигородской научной станции (ЗНС) в 2009–2011 гг. приведены на Рис. 2.

Приводятся результаты модернизации программ обработки и визуализации содарных данных, продемонстрировавшие сильную зависимость количества идентифицируемых волновых эпизодов от разрешающей способности аппаратуры. Приводится статистика пространственно-временных масштабов цугов ВКГ, полученная по данным синхронного содарного мо-

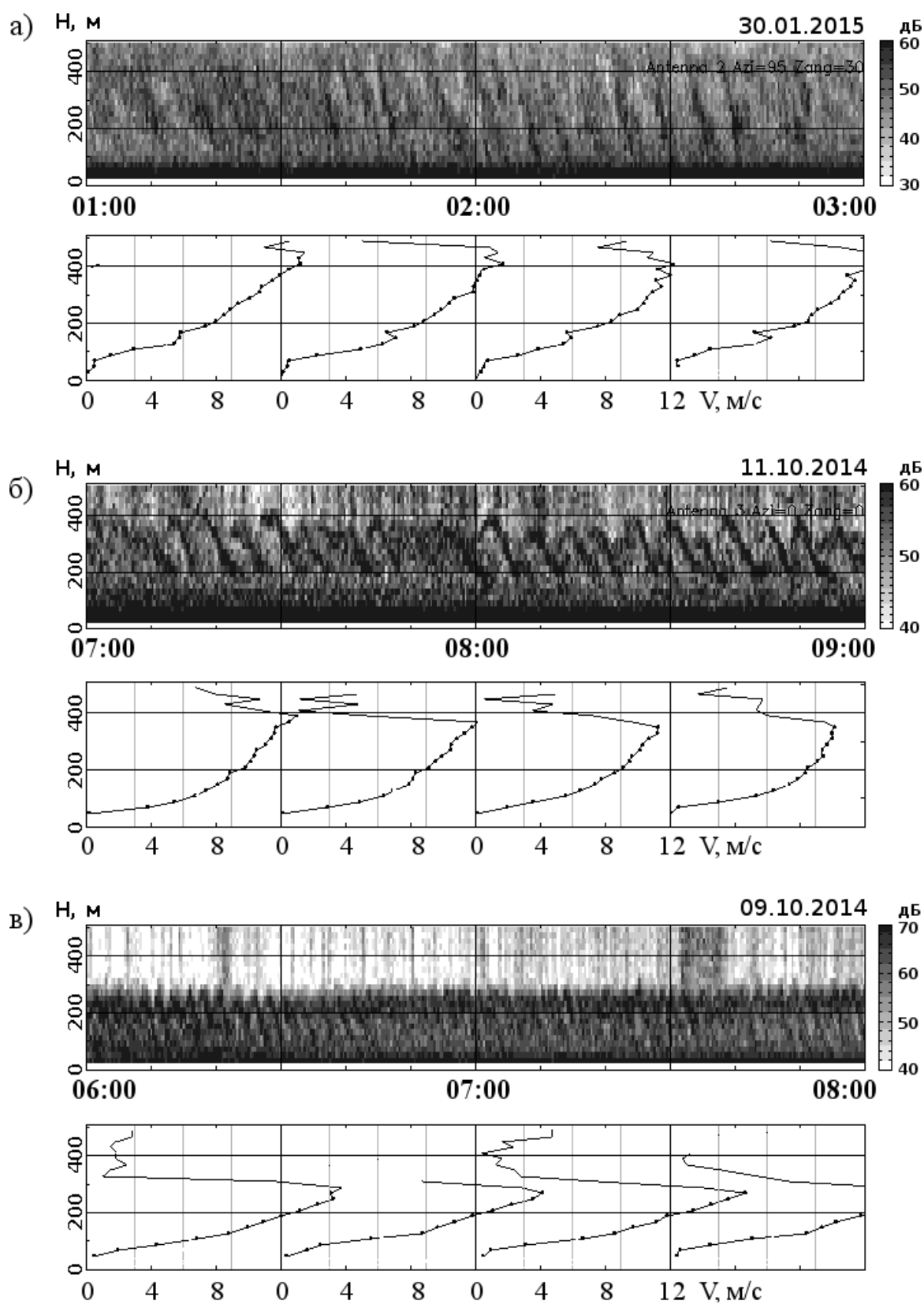


Рис. 1. Визуализация ВКГ содаром ЛАТАН-3, ЗНС ИФА. Под эхограммами представлены осреднённые за 30 мин профили модуля горизонтальной скорости.

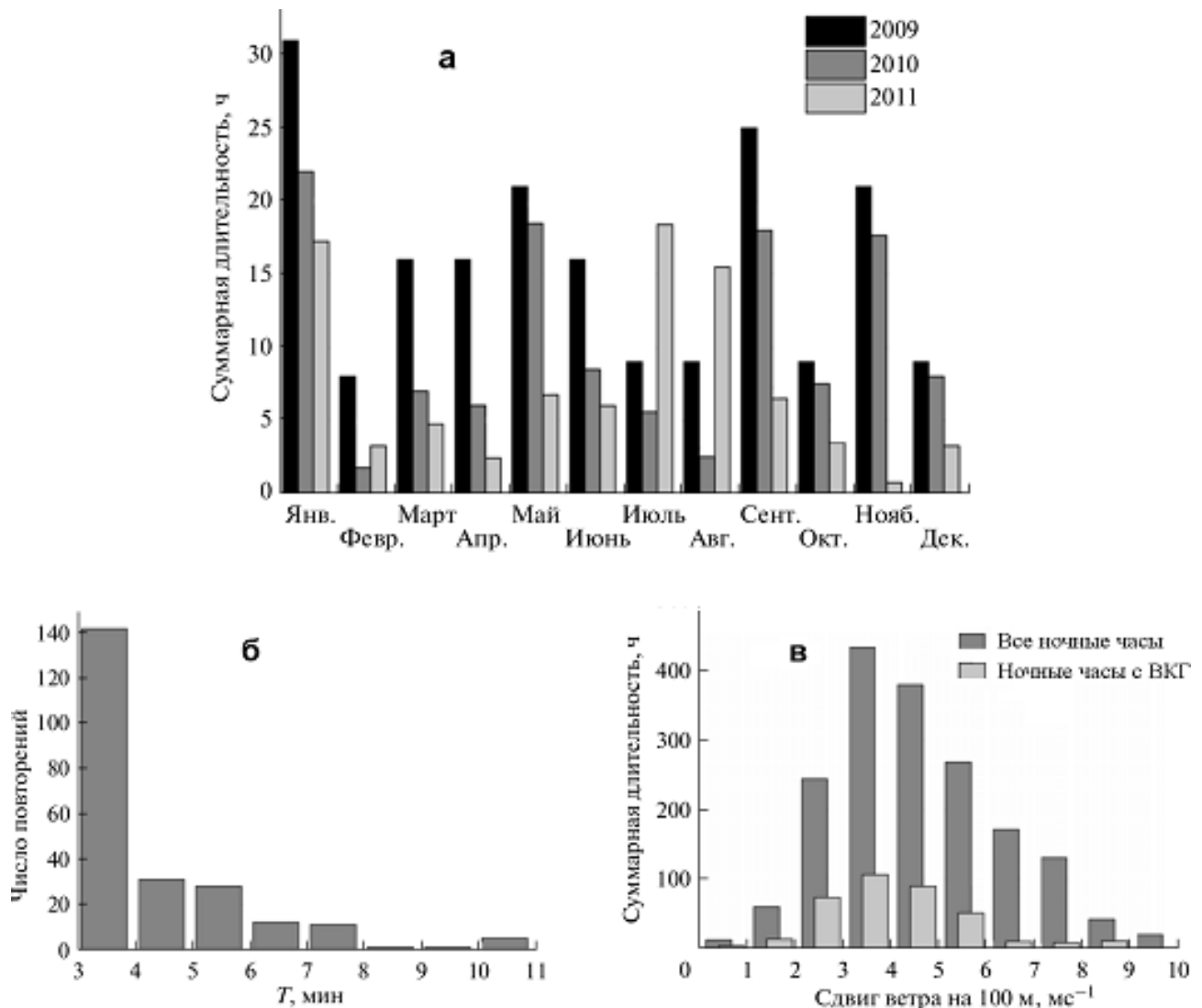


Рис. 2. Статистика параметров ВКГ в Московской области. (а) - Распределение по месяцам суммарной длительности (в часах) регистрации волн на ЗНС; межгодовая изменчивость превышает межсезонную. (б) - Распределение периодов ВКГ; “обрезание” распределения со стороны малых периодов вызвано ограниченной разрешающей способностью использовавшегося содара. (в) - Распределения суммарной длительности регистрации ночных струйных течений и регистрации ВКГ по величине вертикальных сдвигов скорости ветра; подобие этих распределений свидетельствует об отсутствии непосредственного (т.е. без учёта градиента температуры) влияния величины сдвига скорости ветра на возникновение ВКГ.

ниторинга 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). Пример синхронной регистрации ВКГ на содарных эхограммах в трех пунктах сети зондирования приведен на Рис. 3.

Исследуется связь частоты наблюдения ВКГ с синоптической ситуацией. На Рис. 4 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.

Приведены результаты экспедиционных наблюдений ВКГ в Антарктике, в аридных и прибрежных регионах.

Четвертая глава посвящена исследованию внутренней структуры волн Кельвина-Гельмгольца в АПС. Приводится описание метода композитного анализа содарных данных. Для выявления регулярной структуры ветрового поля внутри ВКГ на фоне флуктуаций мгновенных профилей ветра по данным содара проводится осреднение данных по отдельным валам зарегистрированного цуга ВКГ, с привязкой окна выборки к высоте слоя. Интегрирование осредненного поля отклонений скорости ветра позволяет качественно проанализировать траектории воздушных масс в волновом слое. На Рис. 5 приведен пример композитного анализа содарных данных для эпизода ВКГ. Приводятся расчёты вектора скорости ветра внутри волны, показана слабая завихренность поля возмущений скорости и циркуляция воздушных масс.

На Рис. 6 представлены рассчитанные композитные траектории частиц, наложенные на композитное поле интенсивности эхосигнала для двух характерных эпизодов ВКГ в НСТ и кататическом течении, демонстрирующие разный харак-

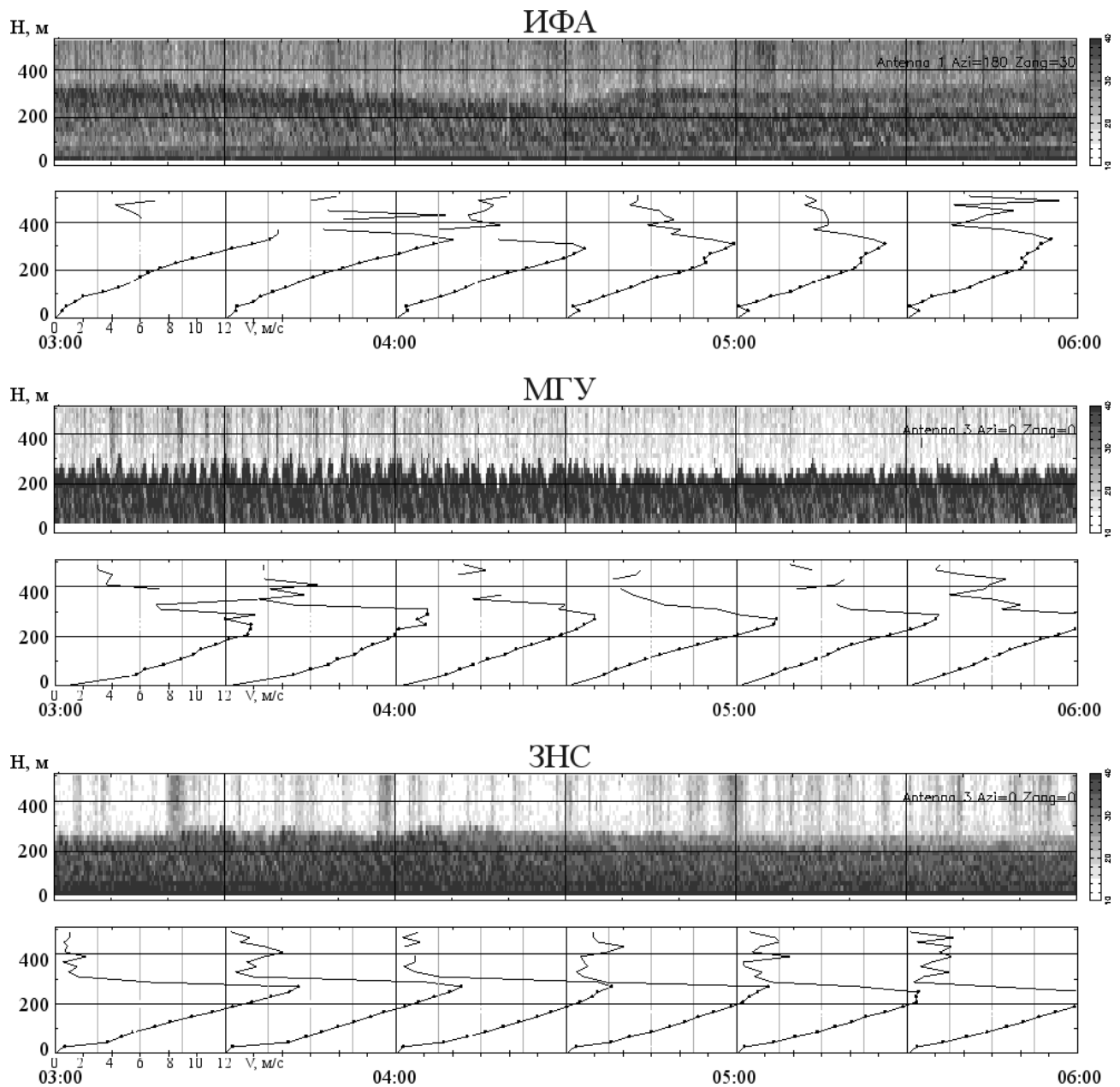
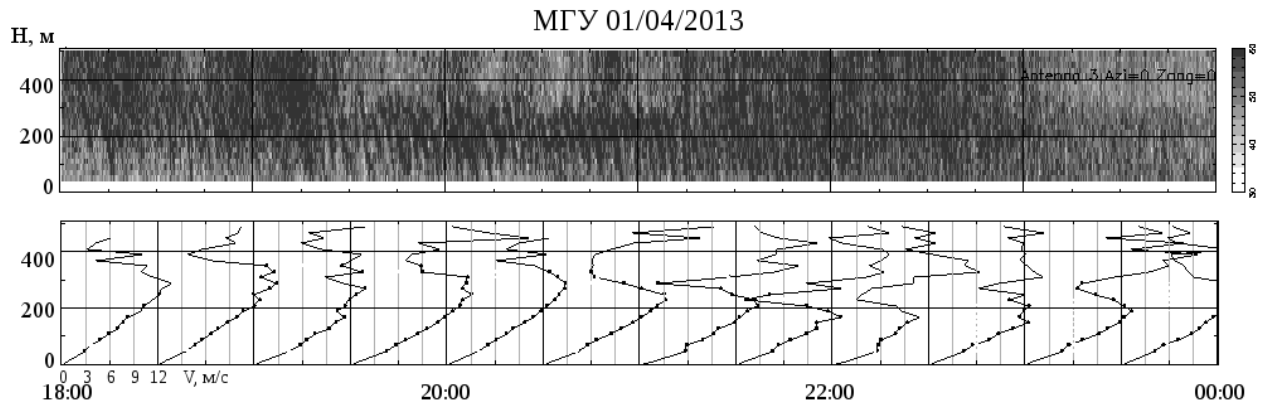
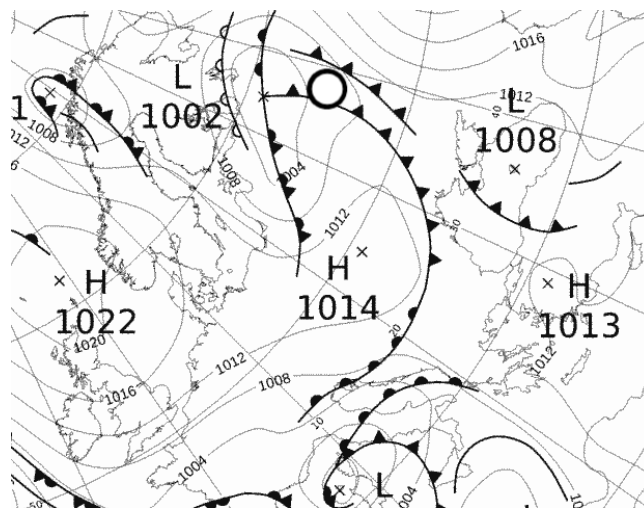


Рис. 3. Пример синхронной регистрации ВКГ в виде наклонных полос на содарных эхограммах в трех пунктах сети зондирования АПС, 29.09.2012. На рисунках верхняя панель — содарные эхограммы, нижняя панель — профили скорости ветра, осредненные за 30 мин. Справа от эхограмм дана шкала относительной интенсивности эхо-сигнала в децибелах. Под панелью профилей скорости даны шкалы скоростей и указано местное время.



(a) Содарная эхограмма



(b) Синоптическая карта

Рис. 4. Пример регистрации ВКГ большой амплитуды вблизи атмосферных фронтов в условиях низкого давления при наличии осадков, 01.04.2013. а) Эхограмма и профили скорости ветра по данным содара МГУ. Справа от эхограммы дана шкала относительной интенсивности эхо-сигнала в децибелах. Под панелью профилей скорости ветра приведена шкала скоростей и указано местное время. б) Синоптическая карта 00 UTC 02.04.2013 по данным реанализа. Кружком обозначен регион содарных измерений.

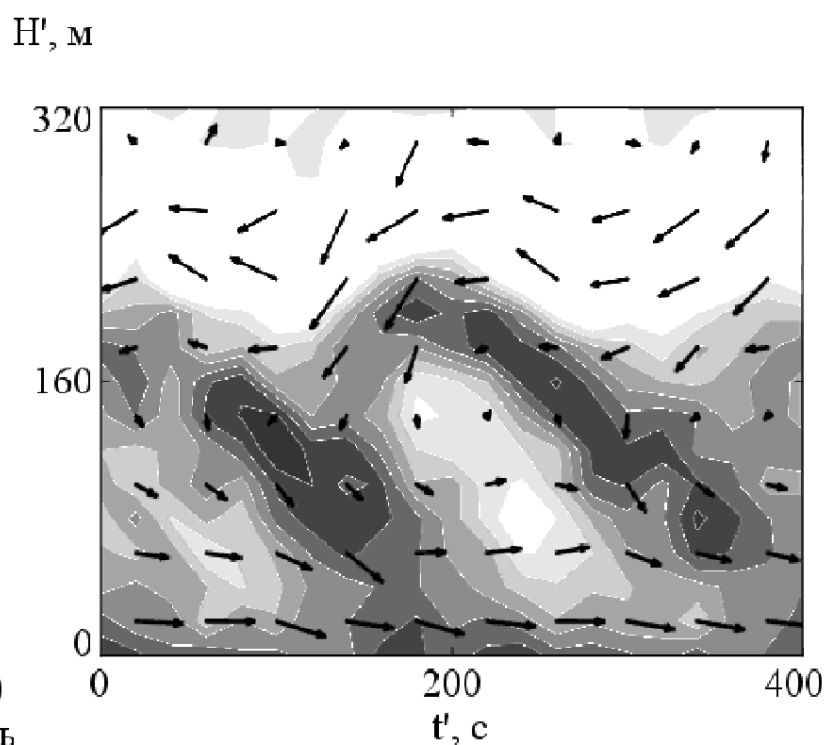
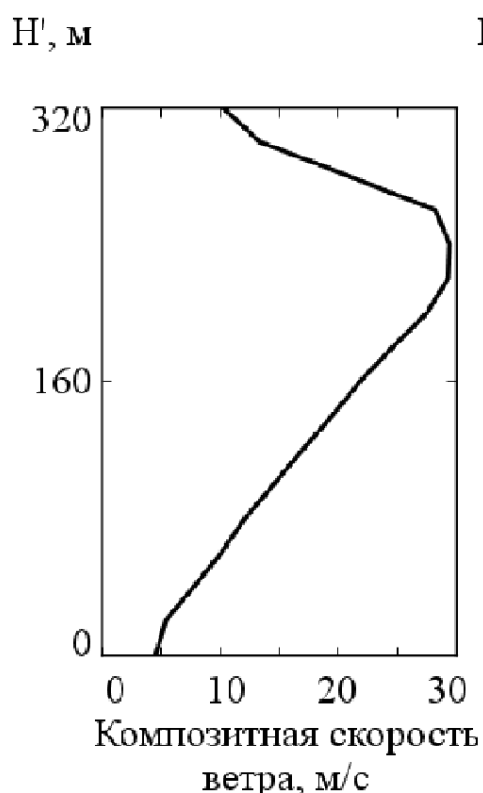
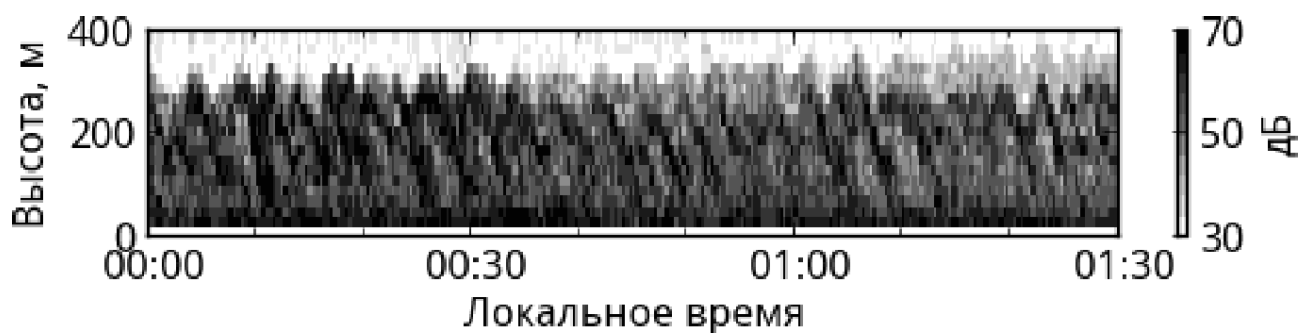
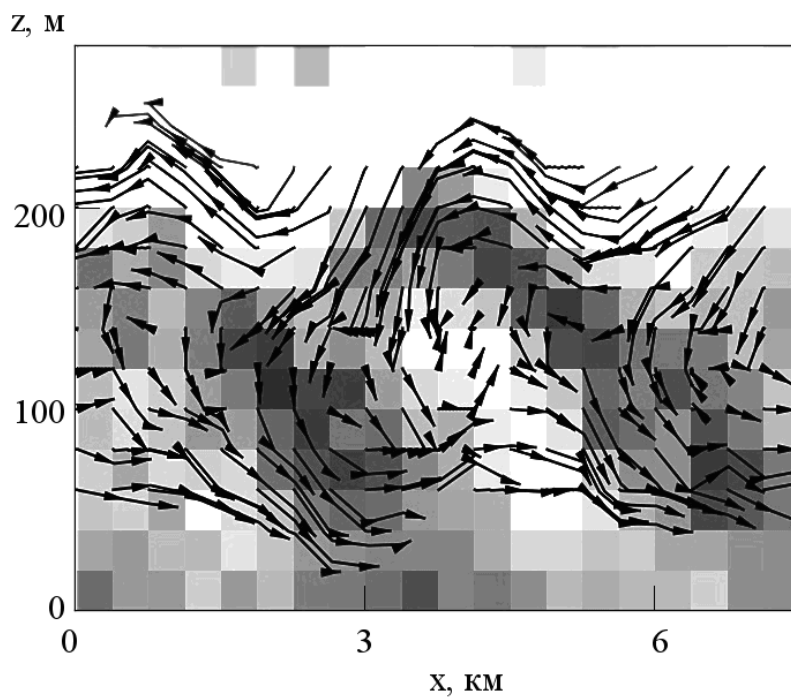


Рис. 5. Пример композитного анализа содарных данных для эпизода ВКГ 29 января 2010 на ЗНС. Вверху — эхограмма содара в координатах высота-локальное время, внизу — результат композитного осреднения по отдельным валам периодической структуры. (а) - композитный профиль скорости ветра в низкоуровневом струйном течении (НСТ), (б) - композитное поле вектора возмущений скорости, наложенное на композитную эхограмму. Стрелками обозначено направление и величина отклонения скорости от среднего значения. По координатам отложены относительное время t' и относительная высота H' для окна осреднения.

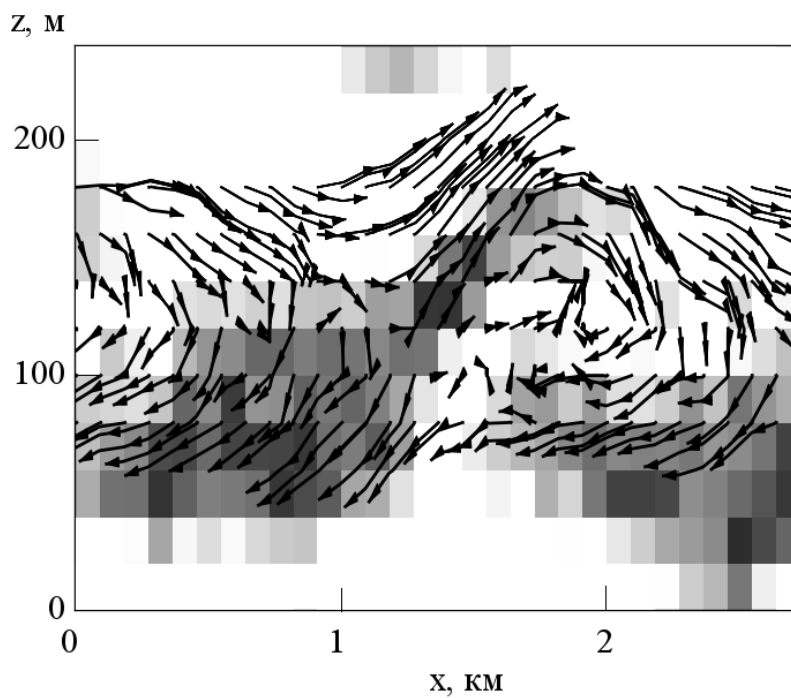
тер завихренности. Приведена оценка скорости циркуляции воздуха в волновом слое.

В Заключении приводятся основные результаты исследования:

- 1) Разработаны методы содарной регистрации и определения параметров волн Кельвина-Гельмольца (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. 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.
- 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 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



(a)



(b)

Рис. 6. 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.

ВКГ. 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 $L/h = 9,2$. 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. Одновременные эпизоды ВКГ на периферии города и в сельской местности были зарегистрированы в 80% от числа дней в году. Статистика синхронных наблюдений показывает, что региональные синоптические условия играют ключевую роль для возникновения ВКГ, и преобладают над локальными особенностями местности наблюдения.
- 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. Предложенная методика обработки содарных эхосигналов с помощью композитного анализа позволила полу-

чить пространственно-временную структуру поля скорости ветра в ВКГ.

- 9) Исследована внутренняя динамическая структура ВКГ, и её связь со средними профилями скорости ветра. В композитных 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.

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.
- 6) *Каллистратова М.А., Петенко И.В., Кузнецов Р.Д., Куличков С.Н., Чхетиани О.Г., Чунчужов 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.

Список литературы

1. *Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978.
2. *Каллистратова М. А.* Экспериментальное исследование рассеяния звуковых волн в атмосфере // ДАН СССР. — 1959. — Т. 125. — С. 69—72.
3. *Обухов А. М.* О рассеянии звука в турбулентном потоке // ДАН СССР. — 1941. — Т. 30. — С. 611—614.
4. *Татарский В. И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. — М. : Наука, 1967. — С. 548.
5. *Baklanov A., Mahura A., Sokhi R.* Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models. — Springer Science & Business Media, 2011.
6. *Coulter R. L., Kallistratova M. A.* The role of acoustic sounding in a high-technology era // Meteorol. Atmos. Phys. — 1999. — Т. 71. — С. 3—13.
7. *Holtlag A. A. M.* [и др.]. Stable atmospheric boundary layers and diurnal cycles: challenges for weather and climate models // Bull. Amer. Meteorol. Soc. — 2013. — Т. 94, № 11. — С. 1691—1706.
8. *Nappo C.* [и др.]. Determining wave-turbulence interactions in the stable boundary layer // Bull. Amer. Meteorol. Soc. — 2014. — Т. 95. — С. 11—13. — DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00235.1.

9. *Nappo C. J.* An introduction to atmospheric gravity waves. — Academic press, 2013.
10. *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. — Т. 2016, № 19. — С. 1053—1054.
11. *Peltier W. R., Caulfield C. P.* Mixing efficiency in stratified shear flows // *Annu. Rev. Fluid Mech.* — 2003. — Т. 35. — С. 135—167.
12. *Sandu I.* [и др.]. Why is it so difficult to represent stably stratified conditions in numerical weather prediction models? // *J. Adv. Model. Earth Syst.* — 2013. — Т. 5. — С. 117—133. — DOI: 10.1002/jame.20013.
13. *Thorpe S. A.* Experiments on instability and turbulence in a stratified shear flow // *J. Fluid Mech.* — 1973. — Т. 61. — С. 731—751.