

На правах рукописи



Зайцева Дарья Владимировна

ВНУТРЕННИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ  
СЛОЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРИЗЕМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО  
ОБМЕНА

Специальность 25.00.29 — Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

Научный руководитель: **Каллистратова Маргарита Александровна**  
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Шакина Наталья Павловна**  
доктор физико-математических наук, заведующий  
отделом авиационной метеорологии Федерального  
государственного бюджетного учреждения высшего  
образования «Гидрометеорологический научно-  
исследовательский центр Российской Федерации»

**Шуруп Андрей Сергеевич**  
кандидат физико-математических наук, доцент  
физического факультета Федерального государственного  
бюджетного учреждения высшего образования  
«Московский государственный университет имени  
М. В. Ломоносова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение  
“Центральная аэрологическая обсерватория”

Защита состоится 06 октября 2022 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.096.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА им. А.М. Обухова РАН и на официальном сайте Института: <http://ifaran.ru/science/dissertations.html>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.096.01  
кандидат физико-математических наук



Чернокульский  
Александр Владимирович

## **Общая характеристика работы**

Работа посвящена экспериментальному исследованию параметров внутренних гравитационных волн (ВГВ), захваченных устойчиво стратифицированным атмосферным пограничным слоем (УАПС), а также анализу воздействия ВГВ на обменные процессы в УАПС. В качестве основного инструмента исследования ВГВ использовались акустические локаторы (сонары), позволяющие регистрировать субмезомасштабные структуры в поле интенсивности мелкомасштабных турбулентных неоднородностей. По доплеровскому сдвигу частоты эхо-сигнала содара определялись вертикальные профили компонент средней скорости ветра и её флуктуаций. На высотно-временных эхограммах интенсивности содарного эхо-сигнала визуализировалась структура атмосферного пограничного слоя (АПС) в диапазоне высот от двух-трех десятков до нескольких сот метров и её изменения на временных масштабах от нескольких десятков секунд до нескольких часов. Это позволило провести классификацию регистрируемых на эхограммах периодических движений в поле мелкомасштабных флуктуаций показателя преломления звука. Рассмотрены ВГВ двух классов: внутренние гравитационно-сдвиговые волны (ВГСВ) типа валов Кельвина-Гельмгольца (ВКГ) и волны плавучести (ВП). На основе экспедиционных содарных измерений в различных местностях, а также многолетних непрерывных содарных измерений в пригороде Москвы, получены данные о частоте повторяемости и параметрах ВГСВ и ВП в различные сезоны.

Для определения характеристик обменных процессов использовались данные высокочастотных измерений флуктуаций температуры воздуха и скорости ветра в приземном слое атмосферы с помощью ультразвуковых термометров-анемометров (соников), расположенных на метеорологических мачтах. Анализировались изменения структурной характеристики температуры, дисперсии вертикальной компоненты скорости ветра, турбулентной кинетической энергии, а также потоков тепла и импульса во время прохождения волн и в смежные промежутки времени. По данным измерений над однородной степью и в пригородной местности были получены количественные оценки изменений характеристик вертикального турбулентного обмена, сопутствующих прохождению цугов волн. Было проведено сопоставление степени влияния цугов волн разных классов.

### Актуальность темы

Актуальность темы диссертации обусловлена ролью ВГВ в формировании структуры и динамики УАПС.

Через АПС происходит обмен теплом, импульсом и примесями между земной

поверхностью и свободной атмосферой. Обменные процессы в АПС определяют погоду и качество воздуха, воздействуют на распространение звуковых и оптических волн, влияют на выпадение осадков, на эффективность работы ветровых турбин, на безопасность воздушной навигации. Долгое время в атмосферных исследованиях устойчивой стратификации уделялось гораздо меньше внимания, чем нейтральной и неустойчивой. Однако, в последние годы в мировых исследованиях АПС наибольшее внимание уделяется именно устойчиво стратифицированным пограничным слоям, поскольку физические механизмы турбулентного перемешивания в них до сих пор недостаточно поняты и плохо параметризуются.

Усиление интереса к деталям строения и эволюции УАПС произошло в конце прошлого века в процессе создания и применения всё более подробных мезомасштабных численных моделей АПС, необходимых для краткосрочного регионального прогноза погоды и загрязненности воздуха, а также для многих специальных приложений, таких как ветроэнергетика и аэронавигация [Baklanov *et al.* 2011]. Увеличение мощности вычислительной техники позволило существенно улучшить пространственную разрешающую способность оперативных моделей — вплоть до километра по горизонтали и десятков метров по вертикали. Однако, оказалось, что такое улучшение разрешающей способности не приводит к повышению оправдываемости прогноза.

Более того, были обнаружены систематические ошибки оперативных региональных прогнозов в предсказании значений приповерхностных метеорологических величин. Так, например, прогнозируемая температура воздуха на высоте двух метров в ночное время часто на несколько градусов превышает наблюдаемую. Для исправления этого положения в современных оперативных моделях (например, в моделях Европейского центра мезомасштабных прогнозов погоды, ECMWF) вводятся физически не обоснованные эмпирические «функции устойчивости», которые искусственно увеличивают вертикальную турбулентную диффузию в УАПС и, как следствие, уменьшают ошибки моделирования приземной температуры воздуха, а также давления в циклонах [Sandu *et al.* 2013]. Очевидно, что такой путь улучшения прогнозов является малоперспективным, поэтому в настоящее время сотни публикаций посвящены усовершенствованию физической параметризации УАПС с учётом многих факторов, например, радиационного обмена, неоднородности поверхности, и т.п. [Edwards *et al.* 2020]. В число таких факторов необходимо включать и генерируемые, либо захваченные в УАПС субмезомасштабные ВГВ, которые воздействуют на обменные процессы в этом слое [Sun *et al.* 2015]. Однако, к настоящему времени учёт ВГВ в подсеточной параметризации УАПС был предложен лишь для мезомасштабных орографических волн, вызванных холмистостью подстилающей поверхности [Tsiringakis *et al.* 2017], а для волнообразных движений неорографического

происхождения, которые наблюдаются в УАПС повсеместно, подобные параметризации отсутствуют.

До сих пор не ясны все механизмы посредством которых происходит взаимодействие между волнами и турбулентностью и нет единого мнения о том, в какой мере различные волнообразные движения влияют на интенсивность турбулентного обмена в УАПС. Теоретические и численные исследования этих вопросов чрезвычайно трудны не только в силу сложности и нелинейности проблемы, но также из-за недостаточности экспериментальных данных. Необходимость интенсивных экспериментальных исследований обменных процессов была акцентирована в решениях Международного рабочего совещания по проблеме взаимодействия волн и турбулентности в УАПС, проводившегося в Американском Национальном Центре для атмосферных исследований (NCAR) [Nappo et al. 2014]. В последние десятилетия было проведено много специальных полевых кампаний по исследованиям УАПС (см., например, CASES99, CBLAST-Low, FLOSS-II, SABLES2006, BLLAST, SHEBA, WFIP, WFIP2, ISOBAR), материалы которых продолжают обрабатываться.

Проведенные в диссертации экспериментальные исследования свойств и параметров ВГВ в АПС, а также получение количественных оценок степени воздействия ВГВ на характеристики обменных процессов являются актуальными, и будут способствовать, в перспективе, усовершенствованию параметризаций потоков тепла и импульса в численных мезомасштабных прогностических моделях АПС.

### Цель работы

Целью настоящей работы является получение количественных оценок степени влияния внутренних гравитационных волн на турбулентный обмен в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое.

В соответствии с поставленной целью были решены следующие задачи:

1. Проведение комплексных экспериментальных исследований турбулентной структуры АПС в различных местностях и сопоставление методов детектирования волновых движений в АПС: с помощью содаров, микробарографов и *in situ* измерений на мачтах.
2. Разработка критериев классификации волнообразных движений, наблюдаемых на содарных эхограммах, и выявление эпизодов, относящихся к двум основным классам ВГВ в АПС: волнам плавучести и внутренним гравитационно-сдвиговым волнам типа валов Кельвина-Гельмгольца.
3. Статистический анализ параметров волн разных классов по данным экспедиционных измерений и многолетних измерений на стационарном пункте в слабо неоднородной

сельской местности в пригороде Москвы.

4. Разработка методов количественной оценки воздействия цугов волн в АПС на характеристики турбулентности на основе натуральных измерений.
5. Получение количественных оценок влияния цугов волн на характеристики турбулентности, рассчитываемые внутри слоя волновой активности и в приземном слое атмосферы. Сопоставление полученных оценок для различных классов волн.
6. Сопоставление полученных экспериментальных оценок с опубликованными ранее экспериментальными и модельными данными.

### Методы исследования

В качестве основного инструмента для регистрации волнообразных движений в АПС использовались доплеровские акустические локаторы (содары). Дистанционное акустическое зондирование не нарушает воздушное течение, позволяет визуализировать вертикальную структуру цугов волн, оценивать амплитуду и периоды волн, определять высотное расположение волнового слоя и продолжительность его существования. Идентификация и классификация волн производилась при помощи визуального анализа содарных эхограмм.

Вертикальные профили компонент скорости ветра и их флуктуации определялись по доплеровским содарным измерениям. Вертикальные профили средней температуры воздуха в АПС определялись сканирующим радиометром. Для расчёта характеристик турбулентности в приземном слое атмосферы использовались стандартные микрометеорологические измерения с помощью акустических термометров-анемометров на мачтах.

Для получения количественных оценок воздействия ВГВ на характеристики вертикального обмена, измерения последних проводились в смежные промежутки времени — до появления волн и во время их прохождения (при контроле стационарности средних метеорологических условий в АПС). Для разделения вклада турбулентных и волновых движений в приземном слое вычисления этих характеристик проводились с различным временем осреднения. Кроме того, рассчитывались энергетические спектры потоков тепла и импульса.

### Научная новизна

1. Впервые анализ воздействия ВГВ в АПС на интенсивность обменных процессов проведен на основе данных длительной серии натуральных измерений, обработанных по единой методике.
2. Впервые предложен и реализован метод получения количественных оценок степени

воздействия ВГВ по данным микрометеорологических измерений для временных периодов, смежных с эпизодами волной активности, при сохранении средних метеорологических условий.

3. Впервые с помощью акустического зондирования АПС исследование воздействия проведено отдельно для двух классов ВГВ – внутренних гравитационно-сдвиговых волн (ВГСВ) и волн плавучести (ВП).
4. Впервые продемонстрированы различия в степени воздействия волн различных классов на турбулентность.

#### Научная и практическая значимость

Экспериментальные исследования влияния генерируемых и захваченных в УАПС волн на интенсивность вертикального обмена необходимы для верификации результатов численных экспериментов и для уточнения параметризаций, используемых при моделировании УАПС.

Потенциальными потребителями результатов диссертации являются различные организации Российской Академии наук, Росгидромета, Министерства образования и науки РФ.

#### Апробация работы

Материалы диссертации были представлены в виде докладов на двух российских школах-конференциях молодых учёных “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические Эффекты” (Борок, 2017; Борок 2020), на двух международных симпозиумах по развитию дистанционного зондирования атмосферного пограничного слоя ISARS (Болгария, 2016; Германия, 2018), на семинаре в Институте физики атмосферы Китайской академии наук (Пекин, 2018), на международной конференции «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (Москва, 2020), на семинаре отдела динамики атмосферы ИФА им. А.М. Обухова РАН 16 сентября 2021 года, а также на семинаре «Экологический мониторинг и исследование антропогенных воздействий на окружающую среду», ИФА им. А.М. Обухова РАН 18 октября 2021 года.

#### Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 18 печатных работах, 8 из которых в изданиях индексируемых WoS и Scopus, 2 статьи во входящих в РИНЦ сборниках трудов, 8 – в сборниках тезисов российских и международных конференций.

#### **На защиту выносятся следующие положения и результаты:**

1. Критерии разделения периодических структур, регистрируемых на содарных эхограммах на два класса — внутренние гравитационно-сдвиговые волны (ВГСВ) и волны плавучести (ВП).
2. Результаты статистического анализа параметров периодических структур двух классов волн для примерно тысячи эпизодов по данным измерений в 2008-2015 гг. в Московской области.
3. Метод количественной оценки воздействия ВГВ в АПС на обменные процессы с помощью сопоставления микрометеорологических характеристик приземного слоя атмосферы в смежные периоды времени, отличающиеся присутствием или отсутствием волновых структур на содарных эхограммах.
4. Описание и анализ средних величин потоков тепла и импульса и их спектров для 41 наиболее отчётливых из зарегистрированных эпизодов ВГВ. Результаты анализа изменения значений характеристик турбулентности и вертикальных профилей температуры воздуха и скорости ветра до и во время прохождения цугов волн.
5. Количественные оценки степени влияния цугов волн двух классов на рассчитываемые характеристики турбулентности.
6. Результаты качественного сопоставления полученных экспериментальных оценок с опубликованными ранее.

#### Личный вклад автора

Автор принимала непосредственное участие в постановке и решении всех задач диссертационной работы. Она проводила содарные измерения в 6 полевых экспедициях в Калмыкии, в Ростовской области и в прибрежной зоне Черного моря. Автором была самостоятельно проведена основная часть анализа содарных эхограмм, разработаны и применены критерии разделения ВГВ в АПС на классы. Автором была разработана методика получения количественной информации о степени воздействия ВГВ на обменные процессы. Автор провела обработку всех использованных в диссертации содарных и микрометеорологических данных, включая расчеты параметров волн и характеристик турбулентности, а также представление их статистики и обобщенных свойств.

#### Достоверность и обоснованность научных положений и выводов

Все положения представленной диссертационной работы обоснованы и соответствуют общефизическим представлениям о структуре и динамике атмосферного пограничного слоя. Их достоверность обеспечена применением апробированной измерительной аппаратуры и согласием результатов измерений, проведенных в различных местностях в ходе многочисленных экспедиций и многолетнего мониторинга АПС в стационарном



измерительном пункте. Выводы работы прошли достаточную апробацию как в виде докладов на конференциях и симпозиумах, так и в виде публикаций в реферируемых научных журналах.

## **Содержание работы**

### Структура диссертации

Работа включает в себя введение, три главы, заключение, два приложения, а также списки цитируемой литературы, иллюстраций и таблиц. В работе содержится 39 рисунков и 6 таблиц. Список литературы состоит из 164 публикаций.

Во введении изложены актуальность темы исследования, цель и задачи работы, методы исследования, апробация, основные положения, выносимые на защиту, и научная новизна работы, а также личный вклад автора.

Первая глава носит обзорный характер. Исследованиям гидродинамических волн в атмосфере посвящено несколько специальных монографий (например, [Госсард и Хук 1978.; Шакина 1990; Nappo 2013; Yang X. 2016]) и много сотен работ в научных журналах. Ввиду обширности проблемы невозможно составить здесь всеобъемлющий обзор, поэтому содержание главы имеет своей целью лишь ознакомление с предметом проведенного исследования и современным состоянием вопроса. Традиционно устойчиво стратифицированный атмосферный пограничный слой (УАПС) описывается как полностью турбулизированный слой воздуха. Однако, натурные наблюдения указывают на то, что структура и параметры УАПС могут быть различны. В частности, можно выделить слабо- и сильно-устойчивый режимы УАПС. При наличии сильного ветра вблизи земной поверхности турбулентность может непрерывно генерироваться сдвигом ветра. Возникающие турбулентные вихри ослабляют термическую стратификацию. При таких условиях толщина слоя перемешивания может достигать сотен метров, а турбулентность пребывает в состоянии, близком к равновесию. Сильно устойчивый режим характеризуется слабым ветром вблизи земной поверхности. Сильная приземная температурная инверсия препятствует генерации турбулентности, что приводит к малой толщине слоя перемешивания или к его отсутствию и поведение характеристик турбулентности в вышележащем слое зависит от внешних условий. Нетурбулентные движения различных масштабов могут являться причиной всплесков турбулентности и изменения вертикальной структуры УАПС, причём воздействие субмезомасштабных структур на турбулентность более выражено при сильно устойчивом режиме АПС [Vercauteren and Klein 2015]. Натурные исследования нетурбулентных структур и турбулентного обмена, разработка теоретических схем и сопоставление экспериментальных и модельных результатов

остаются актуальными, так как необходимы для улучшения результатов численного моделирования УАПС [Edwards et al. 2020].

Среди нетурбулентных движений, регистрируемых в УАПС, повсеместно наблюдаются субмезомасштабные волнообразные движения неорографического происхождения. Волны можно разделить по механизму генерации на вихревые и ВГВ [Sun et al. 2015], причем термин «ВГВ» используется в некоторых работах, синонимично термину «волны плавучести» (ВП). Часто наблюдаемым в УАПС примером вихревых волн являются внутренние гравитационно-сдвиговые волны (ВГСВ), генерируемые сдвиговой неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца. Оба класса волн могут быть захвачены в УАПС.

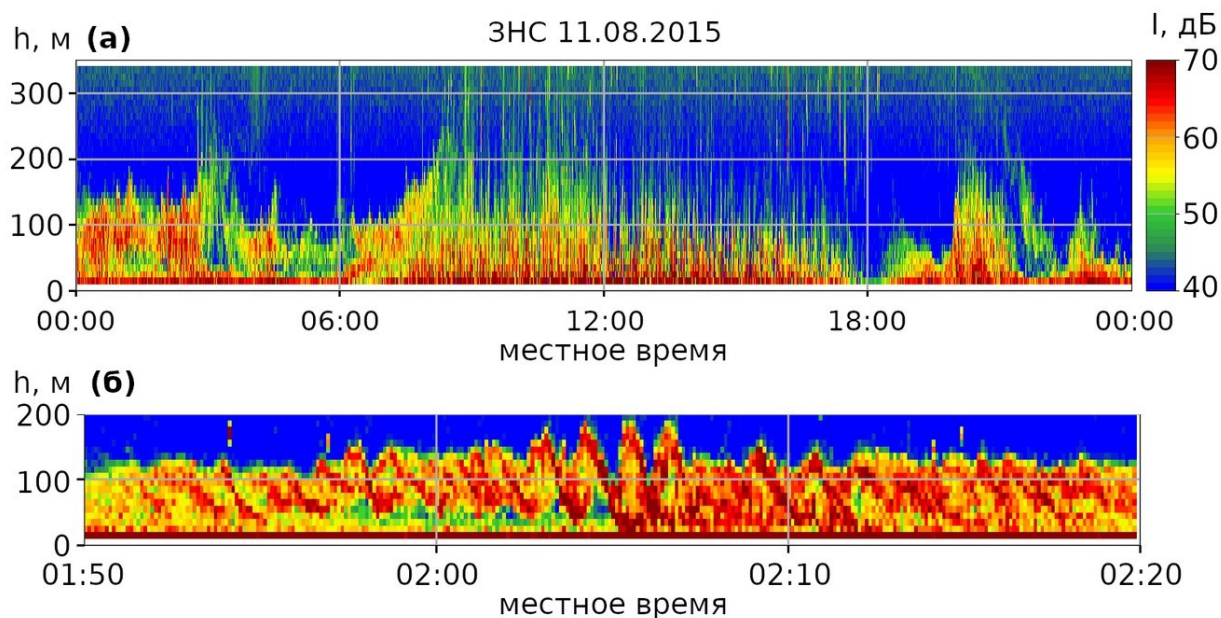
Волны в АПС регистрируются как локальными, так и дистанционными методами. Измерения *in situ* позволяют зарегистрировать колебания, к примеру, ветра и температуры при прохождении цуга волн через измерительные датчики. Часто используемые микробарографические измерения приповерхностного давления с одной стороны значительно меньше подвержены искажению волновых колебаний из-за приземной турбулентности, а с другой стороны не дают возможности однозначно установить высоту расположения волнового слоя. Методики активного дистанционного зондирования, основанные на явлении рассеяния акустических или электромагнитных волн на турбулентных неоднородностях или частицах, позволяют детально задокументировать эволюцию вертикальной структуры волнового цуга. Метод акустического зондирования хорошо подходит для исследования УАПС. Принцип работы акустического локатора (содара) основан на явлении рассеяния звуковых волн на турбулентных неоднородностях температуры воздуха, скорости ветра и влажности. При работе в моностатическом режиме содаром регистрируется только рассеяние назад, происходящее преимущественно на неоднородностях температуры. В этом случае интенсивность регистрируемого эхо-сигнала пропорциональна структурной характеристике температуры  $C_T^2 = \langle (T_1 - T_2)^2 \rangle r_{1,2}^{-2/3}$  (при условии, что турбулентность локально однородна и изотропна, и масштабы рассеивающих неоднородностей принадлежат инерционному интервалу спектра турбулентности), где  $T_1, T_2$  - температура в точках 1 и 2,  $r_{1,2}$  - расстояние между точками 1 и 2. Масштаб  $l$  рассеивающих назад неоднородностей температуры составляет половину длины зондирующей волны:  $l = \lambda_0 / 2 = c / 2 f_0$ , где  $c$  - скорость звука,  $f_0, \lambda_0$  - несущая частота и длина зондирующей звуковой волны. Доплеровские трёхкомпонентные моностатические содары измеряют вертикальные профили  $C_T^2$ , а также трёх компонент скорости ветра. Одним из ограничений на возможность применения дистанционного зондирования является невозможность проведения измерений в отсутствие соответствующих рассеивающих элементов в атмосфере.

Теоретические, лабораторные и натурные эксперименты указывают на то, что

прохождение ВГВ может сопровождаться всплесками турбулентности [см. обзор *Sun et al. 2015* и ссылки в нём]. Воздействие волн может происходить посредством различных механизмов. Одним из механизмов генерации турбулентности является обрушение волн. Модулирование вертикальных профилей ветра и температуры волной может привести к возникновению статически неустойчивых областей, в которых может происходить интенсификация турбулентности. Также возможен перенос энергии от волн к турбулентности через вторичные неустойчивости. Если волны и турбулентность имеют одинаковые временные масштабы, то становится возможным их непосредственное взаимодействие и обмен энергией. Численные оценки воздействия волн на характеристики турбулентности разнятся от десятков до нескольких сотен процентов [*Nappo et al. 2008, Coulter 1990*].

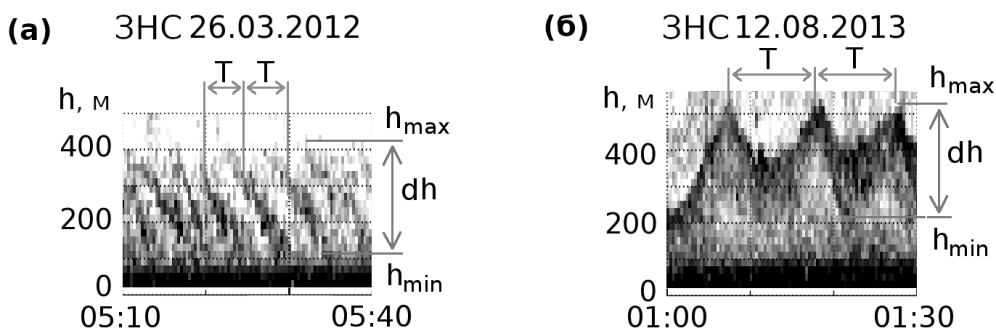
Вторая глава посвящена описанию результатов регистрации волнообразных структур и их климатологии. В главе описаны использованная в работе аппаратура и точки проведения измерений; представлен метод регистрации и классификации волн на содарных эхограммах; приведены данные о совместной регистрации волн при помощи содаров и микробарографов и примеры регистрации волн в различных местностях; представлена статистика частоты появления и параметров волн в пригородной местности.

Регистрация волн в УАПС производилась исследовательскими доплеровскими моностатическими содарами серии ЛАТАН-3, сконструированными в ИФА им. А.М. Обухова РАН [Кузнецов 2007]. В содарах серии ЛАТАН-3 реализован алгоритм, производящий анализ измерений каждого цикла зондирования без осреднения по разным измерениям. Такой метод позволяет добиться наибольшего разрешения по времени, что важно для исследования изменения структуры АПС на небольших временных масштабах. Пример содарной регистрации структуры АПС при хорошей погоде представлен на *Рис. 1а*. При использованном на Цимлянкой научной станции ИФА (ЦНС) режиме работы содара с высотным разрешением 10 м и временным разрешением 6 с возможна регистрация периодических структур с периодами 1-2 мин (*Рис. 1б*). Также использовались данные измерений температурного профилемера, ультразвуковых термометров-анемометров и микробарографов. В работе анализировались данные, полученные в различных измерительных пунктах: в слабо неоднородной пригородной местности, над степной и аридной однородными зонами, в прибрежной зоне над морской поверхностью, а также над снежной поверхностью антарктического ледника.



**Рисунок 1.** Пример содарной регистрации структуры АПС. (а) суточная эхограмма в координатах высота-время. (б) фрагмент эхограммы в увеличенном масштабе, демонстрирующий наличие периодических структур при устойчивой стратификации в ночное время. Справа приведена шкала интенсивности эхо-сигнала, которая пропорциональна интенсивности мелкомасштабных турбулентных пульсаций температуры.

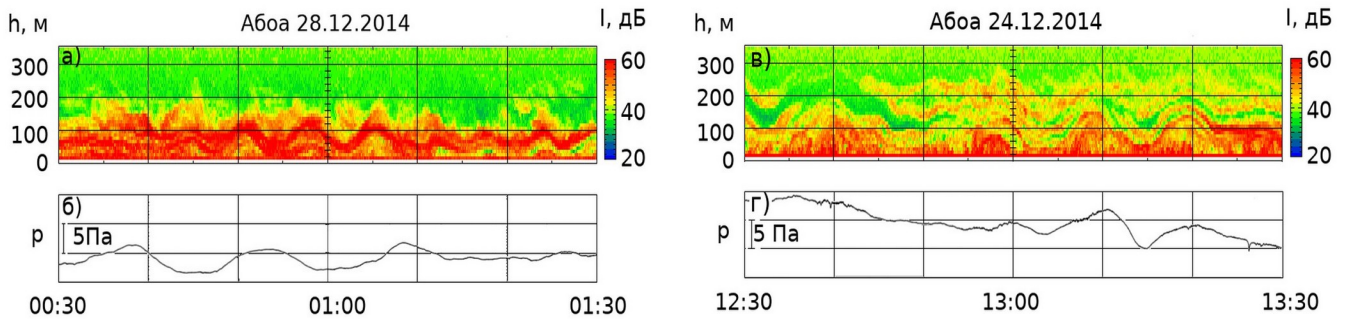
Для идентификации ВГВ применялся визуальный анализ содарных эхограмм. Классификация производилась на основе вертикальной структуры регистрируемых колебаний в поле структурной характеристики температуры  $C_T^2$  и вертикальной скорости  $w$ . Периодические структуры в форме полос, валов или кос, наблюдаемых в поле  $C_T^2$  были отнесены к классу ВГСВ. Синхронные синусообразные колебания высоты расположения одного или нескольких турбулизированных слоёв, регистрируемых в поле  $C_T^2$ , и/или границы приземного слоя были отнесены к классу ВП. На *Рис. 2 а,б* представлены примеры визуализации колебаний класса ВП и ВГСВ на содарных эхограммах, полученных на Звенигородской научной станции (ЗНС) ИФА им. А.М. Обухова РАН.



**Рисунок 2.** Пример визуализации и определения параметров (а) внутренних гравитационно-сдвиговых волн и (б) волн плавучести на содарных эхограммах, полученных на ЗНС. По оси абсцисс отложено местное время, по оси ординат — высота. Степень почернения соответствует интенсивности эхо-сигнала.  $T$  - период волны,  $dh$  — толщина волнового слоя,  $h_{\min}$ ,  $h_{\max}$  — нижняя и верхняя границы волнового слоя.

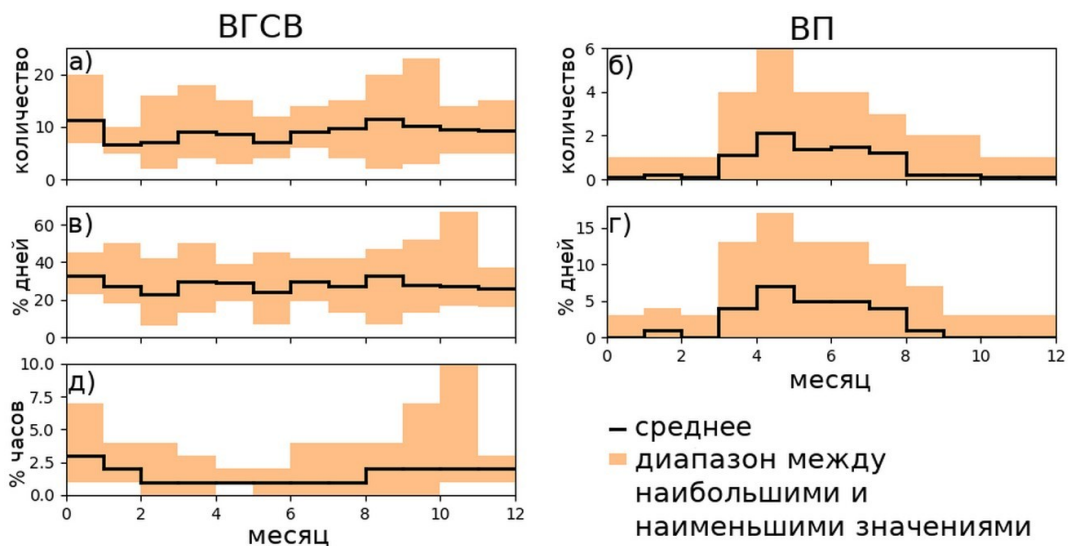
На основе содарной регистрации волн были получены статистические данные о ВГВ в нескольких регионах. В большинстве опубликованных исследований статистики повторяемости и параметров волн в АПС используются микробарографические измерения [например, *Rees et al. 2000*]. Для сопоставления представленных в работе данных с литературными было проведено сравнение синхронной содарной и микробарографической регистрации ВГВ в УАПС. Такого рода сравнения проводились и ранее, основное внимание в них уделялось случаям совпадения параметров волн, одновременно зарегистрированных разными приборами. Однако, в некоторых случаях не наблюдалось соответствия между содарными эхограммами и записями измерений давления [*Hooke et al. 1972*]. На *Рис. 3* приведены примеры синхронных содарных и микробарографических измерений во время прохождения цугов ВП над однородной заснеженной местностью в Антарктике. На *Рис. 3а,б* регистрируемые содаром и микробарографом колебания имеют отличающиеся периоды. На *Рис. 3в,г* изменения амплитуд колебаний, наблюдаемых на эхограмме и барограмме, не соответствуют друг другу. При таких расхождениях климатологическая статистика параметров ВГВ, полученная по содарным и по микробарографическим данным, может различаться.

Причины таких расхождений могут быть различны. Неоднородности плотности воздуха, расположенные выше АПС, вносят вклад в измеряемые вариации приземного давления. Малая толщина слоя, охваченного волновыми движениями может быть связана с малыми амплитудами колебаний давления. Волновые колебания могут не регистрироваться отчётливо на барограммах в случае распространения волн над зонами с развитой конвекцией. Поэтому для проведения климатологических исследований частоты наблюдения и параметров волн необходимо сопровождать измерения давления визуализацией формы волн и высоты расположения волновых слоев с помощью содаров, лидаров, либо радаров.



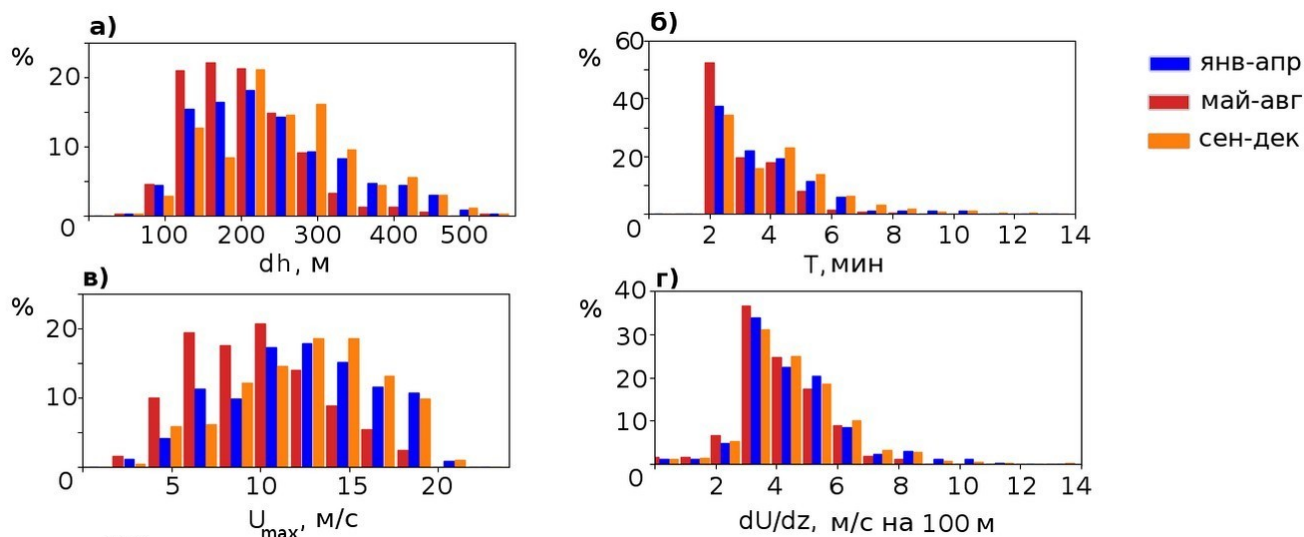
**Рисунок 3.** Примеры синхронных содарных и микробарографических измерений во время прохождения цугов ВП над однородной заснеженной поверхностью в Антарктике. (а,в) эхограммы в координатах высота-время, цветовая шкала приведена справа. (б,г) временные ряды приземного давления. Указанное время - местное.

По данным круглосуточных содарных измерений в 2008-2015 гг. в пригородной местности на Звенигородской научной станции (ЗНС) ИФА был составлен каталог ВГСВ и ВП. Собранный каталог содержит около тысячи эпизодов. На *Рис. 4* показана частота повторяемости ВГСВ и ВП в разные месяцы. Разрешение содара по времени составляло 20 секунд, поэтому в каталог вошли волны с периодами  $T \geq 2$  мин. В среднем ВГСВ наблюдались 25-35 % дней вне зависимости от сезона, а ВП — в 4-8 % с марта по август и <1% в остальные месяцы. В среднем ВГСВ занимали 1-3% времени измерений, а ВП <1% (не показано). Наблюдаемые на ЗНС ВП, в отличие от ВГСВ, появлялись в основном сезонно.

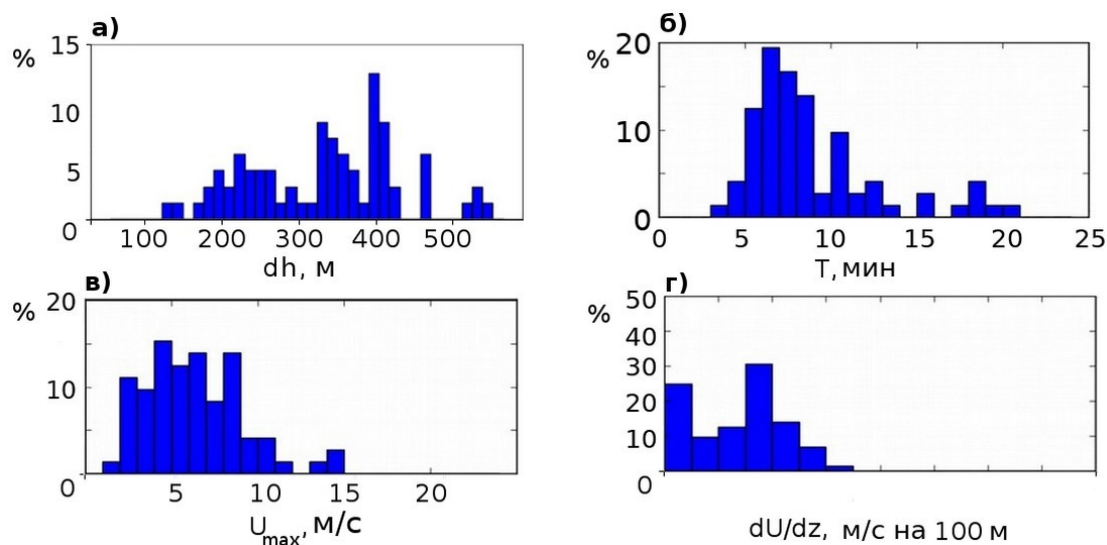


**Рисунок 4.** Частота повторяемости волновых движений в разные месяцы по данным измерений на ЗНС с июля 2008 г. по декабрь 2015 г. Левые панели (а, в, д) для внутренних гравитационно-сдвиговых волн, правые (б, г) для волн плавучести. (а) и (б) – количество зафиксированных эпизодов, шт.; (в) и (г) — доля дней с волновой активностью, %; (д) — доля часов волновой активности, %. По осям абсцисс отложены месяцы.

На Рис. 5 и 6 представлены частотные распределения параметров ВГСВ и ВП, а также наибольших скорости и сдвига ветра во время прохождения цугов. В летнее время (с мая по август) доля цугов ВГСВ с меньшими периодом и толщиной волнового слоя были выше, чем в остальные месяцы.



**Рисунок 5.** Частотное распределение параметров ВГСВ, зарегистрированных на ЗНС с июля 2008 по декабрь 2015. (а) толщина волнового слоя  $dh$ , м; (б) период  $T$ , мин; (в) максимальная скорость внутри волнового слоя  $U_{max}$ , м/с; (г) вертикальный сдвиг ветра  $dU/dz$ , м/с на 100 м; (д) глубина модуляции  $dI$ , дБ. По оси ординат отложена частота повторяемости, %.



**Рисунок 6.** То же, что на Рис. 5 для цугов ВП без разделения на месяцы.

Медианные значения параметров цугов волн и ветровых условий перечислены в Таблице 1. Представленные средние значения различны для цугов разных классов, однако, диапазоны их значений для отдельных эпизодов ВГСВ и ВП перекрываются.

**Таблица 1.** Медианные значения параметров ВГСВ и ВП.

сезон	$h_{\min}$ м	$h_{\max}$ м	$dh$ м	$T$ мин	$U_{\max}$ м/с	$dU/dz$ м/с на 100 м	$dI$ дБ
ВГСВ							
янв.-апр.	100	360	220	3.3	12	4	7
май-авг.	100	320	200	2.0	10	4	8
сент.-дек.	100	400	240	3.5	13	4	7
ВП							
все месяцы	100	560	420	7.0	6	3	13

Глава 3 посвящена описанию результатов исследования степени влияния волн на вертикальный обмен в УАПС. В главе описаны использованные методики расчёта характеристик турбулентности и степени влияния на них эпизодов волновой активности; приведены примеры спектров и временных рядов рассчитанных характеристик во время прохождения волновых цугов; представлены результаты сопоставления степени влияния волн разных классов; приведено сопоставление полученных результатов с результатами других экспериментальных и модельных исследований.

Часто используемый метод оценки влияния волн на турбулентность заключается в разделении вклада от волновых и турбулентных пульсаций в рассчитываемые характеристики турбулентности. Для этого, как правило, проводилось сравнение этих характеристик в приземном слое, рассчитанных при отфильтровывании волновых колебаний из временных рядов и без такого отфильтровывания (например, [Nappo et al. 2008, Durden et al. 2013]).

Методика, предлагаемая в нашей работе подразумевает сравнение значений характеристик турбулентности в смежные периоды времени — до появления цуга волн в УАПС и после прихода цуга (при контроле стационарности внешних условий). Для применения этой методики отбирались наиболее отчётливые случаи волновой активности длительностью не более 120 минут, для которых хорошо определялись время начала и окончания волнового эпизода. Также при отборе ставились условия: нижняя граница волнового слоя опускалась хотя бы до 100 метров; в течение часа до и после эпизода не наблюдалось других волнообразных движений. Первый из указанных критериев необходим из-за использования локальных измерений на мачтах для расчётов характеристик турбулентности.

Чтобы оценить степень влияния волн на характеристики турбулентности, определяемые по стандартным микрометеорологическим измерениям на мачте в приземном слое вначале



рассчитывались временные ряды характеристики  $X$ . После этого определялись средние значения для промежутков времени до (I), во время (II) и после (III) прохождения волнового цуга и анализировались их отношения  $R_1$  и  $R_2$ :

$$R_1 = \frac{\langle X_{II} \rangle}{\langle X_I \rangle}, \quad R_2 = \frac{\langle X_{III} \rangle}{\langle X_{II} \rangle}$$

где  $\langle X_I \rangle$ ,  $\langle X_{II} \rangle$ ,  $\langle X_{III} \rangle$  — средние арифметические значения временных рядов характеристик турбулентности соответственно в промежутках времени I, II и III. Значение  $R_1 > 1$  указывает на то, что во время волнового эпизода соответствующая характеристика принимала в среднем большее значение, чем до прихода цуга. Значение  $R_2 > 1$  указывает на то, что соответствующая характеристика увеличилась после прохождения волны.

В предварительном исследовании были проанализированы 8 эпизодов ВГСВ и 1 эпизод ВП, наблюдавшиеся над ровной степной поверхностью на Цимлянской научной станции (ЦНС) ИФА. По данным содарных измерений рассчитывались следующие характеристики:

1. Усреднённая по волновому слою интенсивность эхо-сигнала  $\tilde{I}$ . В работе оценивались относительные изменения характеристик турбулентности, поэтому абсолютная акустическая калибровка содара не проводилась. Для расчётов использовались относительные значения интенсивности эхо-сигнала  $I = k C_T^2$ , где  $k$  - коэффициент пропорциональности. В силу логнормальности распределения  $C_T^2$ ,  $\tilde{I}$  рассчитывалось как среднее геометрическое значение эхо-сигналов внутри волнового слоя. Для каждого измерения, произведённого в момент времени  $t_j$ , рассчитывались

$$\tilde{I}(t_j) = \left[ \prod_{i=1}^N I(h_i, t_j) \right]^{1/N}, \quad \text{где } h_1, h_N \text{ соответственно высоты нижней и верхней границы}$$

волнового слоя. Для использованных в работе содарных измерений масштабы рассеивающих температурных неоднородностей составляли около 10 см.

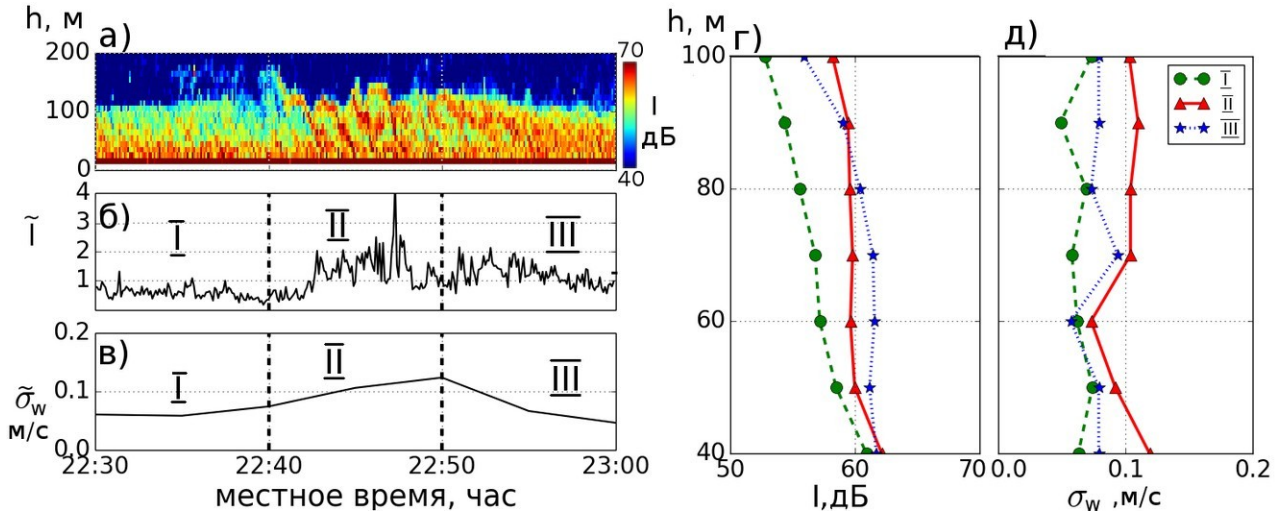
2. Усреднённая по волновому слою дисперсия вертикальной компоненты скорости ветра

$$\tilde{\sigma}_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_w(h_i), \quad \text{где дисперсии } \sigma_w(h_i) = (\overline{w'^2})^{0.5} \text{ рассчитывались по пятиминутным}$$

интервалам времени.

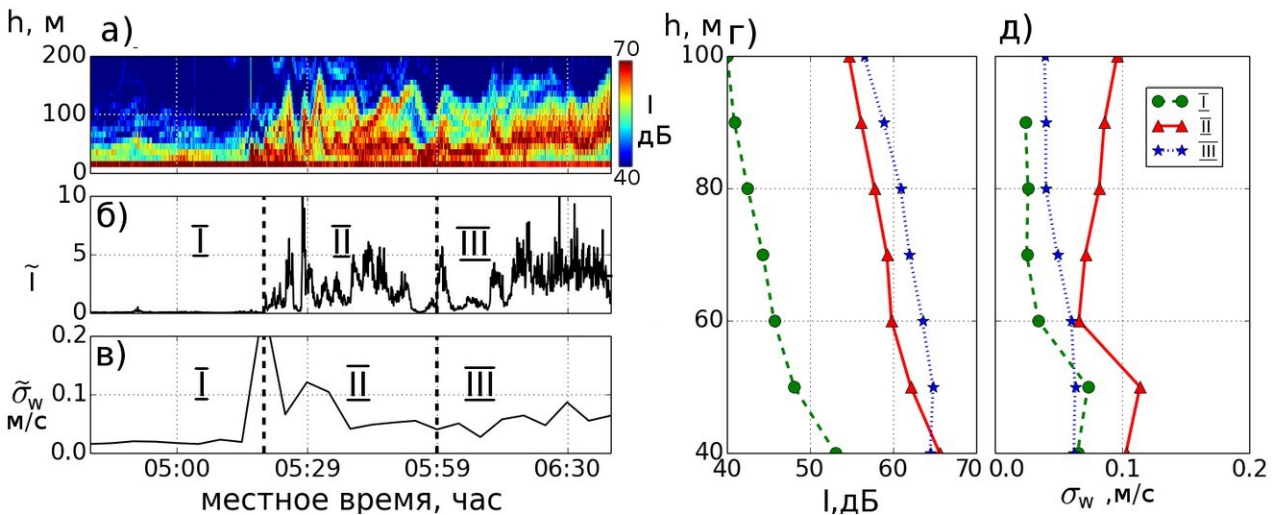
Примеры поведения  $\tilde{I}$  и  $\tilde{\sigma}_w$  во время прохождения цугов ВГСВ и ВП, зарегистрированных на ЦНС, представлены, соответственно, на *Рис. 7* и *8*.

ЦНС 10.08.2015



**Рисунок 7.** Пример поведения  $I$  и  $\sigma_w$  во время прохождения цуга ВГСВ, зарегистрированного на ЦНС. (а) – содарная эхограмма в координатах высота–время. (б) временной ряд средней по волновому слою интенсивности эхо-сигнала  $\tilde{I}$ . (в) среднее по волновому слою среднеквадратичное отклонение вертикальной скорости ветра  $\tilde{\sigma}_w$ . (г) профили эхо-сигнала, осреднённые по временным промежуткам до (I), во время (II) и после прохождения цуга (III). (д) профили  $\sigma_w$ , осреднённые по тем же промежуткам времени.

ЦНС 12.08.2015



**Рисунок 8.** То же, что на Рис. 7 для эпизода ВП, зарегистрированного на ЦНС.

Отношения  $R_1$  и  $R_2$  для величин  $\tilde{I}$  и  $\tilde{\sigma}_w$ , рассчитанных для 8 эпизодов представлены в Таблице 2. Изменения  $\tilde{\sigma}_w$  не превышали двух раз. Для цугов ВГСВ изменения  $\tilde{I}$  оказались на порядок меньше, чем во время цугов ВП.

**Таблица 2.** Значения отношений  $R_1$  и  $R_2$  для величин  $\tilde{I}$  и  $\tilde{\sigma}_w$

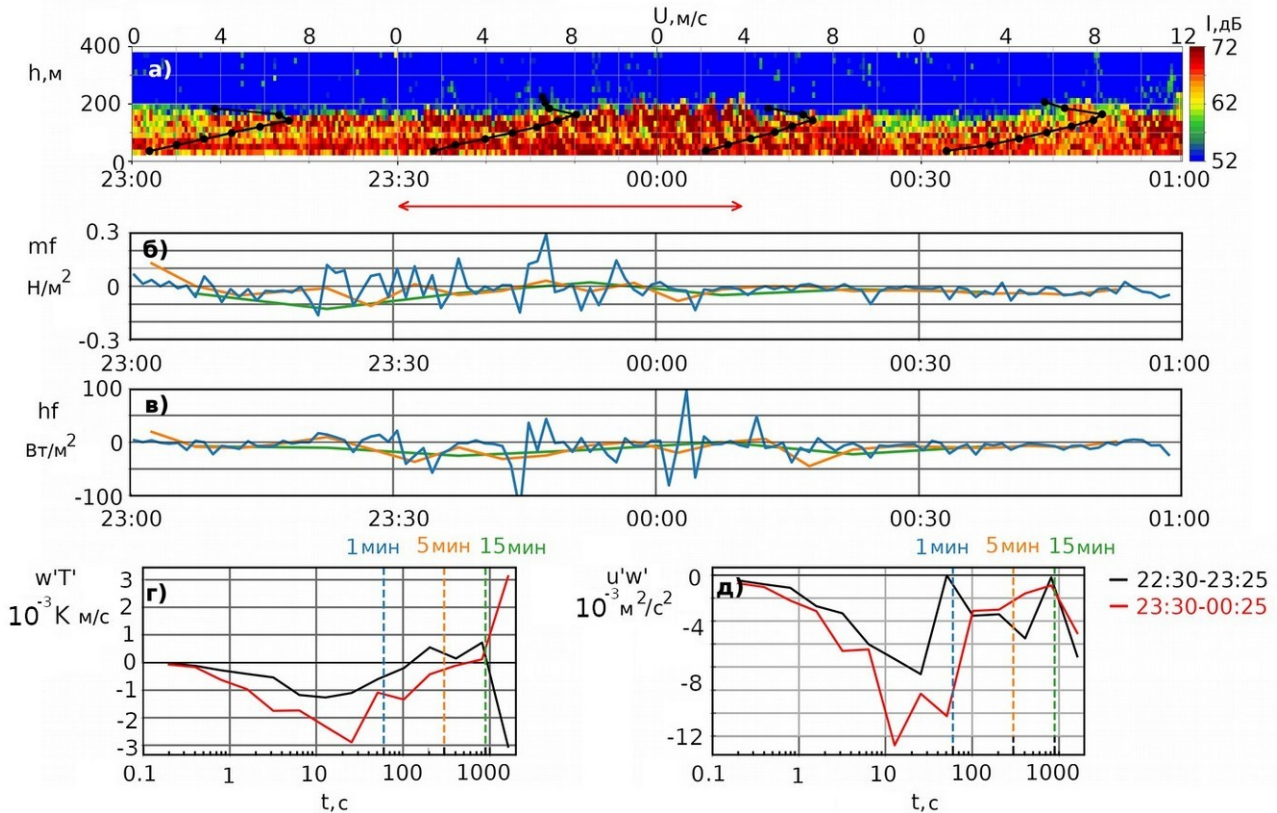
Параметр	R	Класс ВГВ							
		ВГСВ	ВГСВ	ВГСВ	ВГСВ	ВП	ВГСВ	ВГСВ	ВГСВ
$\tilde{I}$	$R_1$	1.5	1.5	3.8	0.8	691.8	12.2	1.3	4.6
	$R_2$	1.2	0.5	0.9	0.3	0.4	3.6	9.5	1.5
$\tilde{\sigma}_w$	$R_1$	1.3	1.0	1.1	1.9	1.5	0.9	1.1	1.1
	$R_2$	0.9	1.0	1.1	1.6	1.8	0.9	1.6	1.1

В дальнейшем было проанализировано поведение характеристик турбулентности под волновым слоем для 30 эпизодов ВГСВ и 11 эпизодов ВП. Три цуга ВГСВ и один цуг ВП наблюдались на ЦНС, остальные на ЗНС. По данным измерений ультразвукового термометра-анемометра для всех случаев были рассчитаны кинетическая энергия возмущений  $ke = \overline{u'^2 + v'^2 + w'^2}$ , и поток импульса  $mf = \rho \overline{u'w'}$ . Для 27 из исследованных случаев также были рассчитаны вертикальные потоки тепла  $hf = c_p \rho \overline{T'w'}$ .  $u', v', w'$  - отклонения компонент скорости ветра от средних значений;  $c_p$  - удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении;  $\rho$  - плотность воздуха;  $T'$  - отклонения температуры от среднего значения.

Для каждого эпизода были проанализированы спектральные разложения потоков тепла и импульса. Примеры поведения характеристик турбулентности и их спектров для цугов ВГСВ и ВП представлены соответственно на *Рис. 9, 10*. Для проанализированных эпизодов положение спектрального провала менялось от десятков секунд до десятков минут, а в некоторых случаях спектральный провал отсутствовал. В работе использованы расчёты со временем осреднения 1, 15 и 30 минут. Характеристики, рассчитанные со временем осреднения 1 минута рассматривались как турбулентные, а остальные — как содержащие вклад и от турбулентных пульсаций, и от волнообразных движений.

Только для 10 из 30 эпизодов ВГСВ и 10 из 11 эпизодов ВП было возможно указать на наличие заметного влияния цуга на значения  $ke$ ,  $hf$  и  $mf$ . Из них 10 цугов ВГСВ и 10 цугов ВП наблюдались на ЗНС, а оставшийся цуг ВП наблюдался на ЦНС. В *Таблице 3* представлены средние по этим эпизодам значения характеристик турбулентности и отношений  $R_1$ . Значения  $R_1$  в среднем оказались выше для ВП, однако величины характеристик турбулентности в среднем были близки для обоих классов волн.

ЗНС 15-16.05.2009

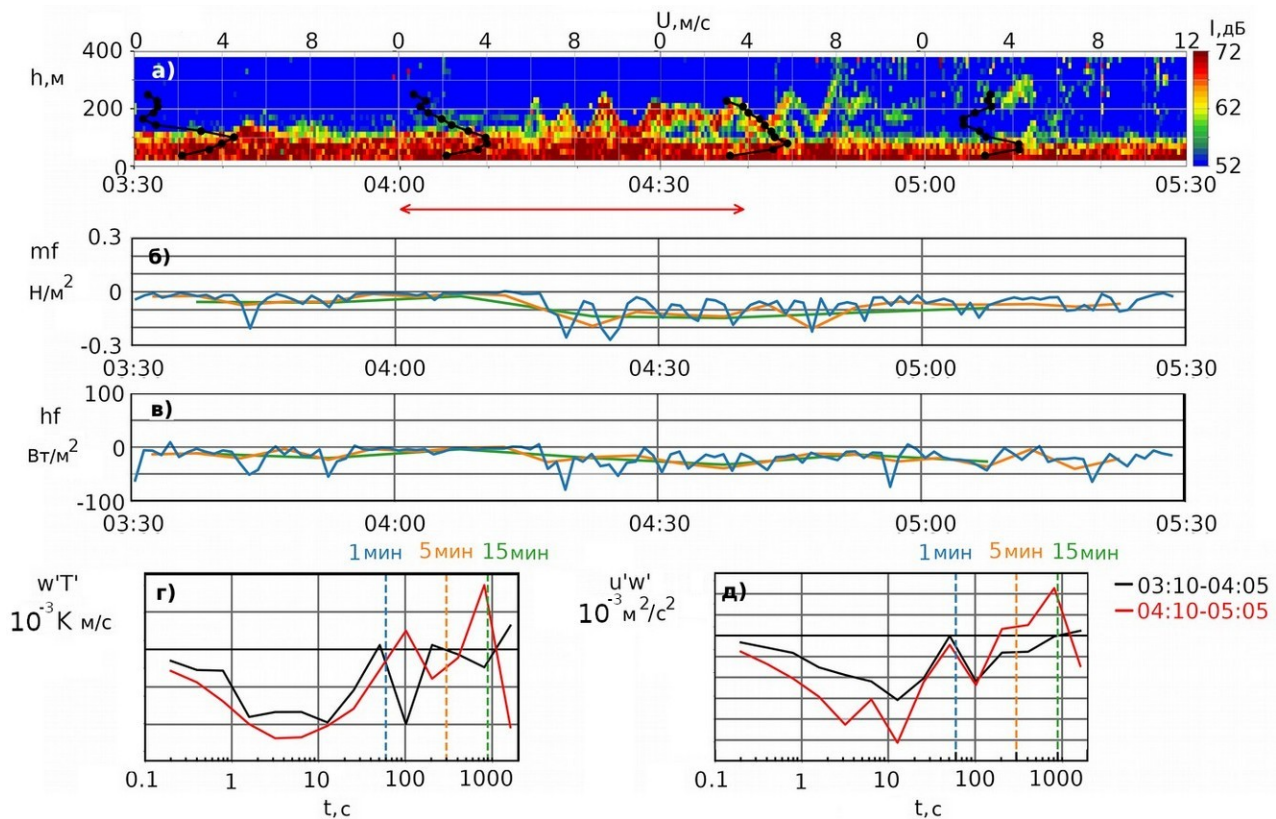


**Рисунок 9.** Пример поведения турбулентных характеристик и их спектров во время прохождения цуга ВГСВ, зарегистрированного на ЗНС. (а) — эхограмма в координатах высота-время. (б), (в) — временные ряды потоков тепла и импульса, рассчитанные при времени осреднения 1, 5 и 15 минут. (г), (д) — спектры кинематических потоков тепла и импульса для промежутков времени до (22:30-23:25) и во время прохождения цуга ВГСВ (23:30-00:25).

Представлены сопоставления полученных результатов с другими экспериментальными работами, а также с численным исследованием. Значения характеристик турбулентности сопоставимы с получаемыми в других работах [например, *Durden et al. 2013*], а также с численным моделированием влияния ВКГ на пограничный слой [*Jiang 2021*]. Значения степени увеличения  $ke$  также согласуются с моделированием *Jiang 2021*. Слабое изменение дисперсии вертикальной скорости согласуется с моделированием *Jiang 2021* и с результатами *Durden et al. 2013*, однако, противоречит данным *Coulter 1990*, указывающим на трёхкратное увеличение дисперсии в присутствии ВКГ. Было замечено, что в среднем ВП привели к более сильному изменению значений характеристик турбулентности, чем ВКГ. Причина этого может крыться в более интенсивных вертикальных движениях, возникающих вследствие прохождения цугов ВП и приводящих к вертикальному перемешиванию [*Sun et al. 2012*]. Кроме того, наиболее чёткие эпизоды ВП, отобранные для представленного анализа, наблюдались при меньших скоростях ветра, чем ВКГ. Это

привело к тому, что в среднем характеристики турбулентности оказались близки для двух классов, а степени усиления — различны. Влияние субмезомасштабных движений на турбулентность оказывается различным при сильной и слабой устойчивости [Vercauteren and Klein 2015].

ЗНС 24.04.2012



**Рисунок 10.** То же, что на Рис. 9, но для цуга ВП.

**Таблица 3.** Средние значения изменения характеристик турбулентности при прохождении цугов волн, оказавших влияние на интенсивность турбулентности.

1 мин						
	ke	$R_1$	mf	$R_1$	hf	$R_1$
ВГСВ	0.5	2.4 (2.4)	-0.07	5.6 (3.6)	-12	2.3 (2.2)
ВП	0.6	7.0 (5.9)	-0.07	98.5 (5.3)	-7	8.0 (4.9)
30 мин						
ВГСВ	0.8	1.9 (1.9)	-0.07	2.3 (2.2)	-14	1.9 (2.0)
ВП	3.9	7.6 (2.7)	-0.16	14.6 (3.5)	-21	531.0 (1.1)

В заключении приведены основные результаты работы:

- 1) Разработаны критерии детектирования периодических движений, относящихся к волнам плавучести (ВП) и к гравитационно-сдвиговым волнам (ВГСВ) типа валов Кельвина-

- Гельмгольца, по данным содарного зондирования. Предлагаемый метод детектирования основан на визуальном анализе вертикальной структуры цугов волн в поле содарного эхо-сигнала и вертикальной скорости ветра.
- 2) Проведено сопоставление синхронных содарных и микробарографических измерений. Показано, что волновые движения не всегда одинаково регистрируются этими приборами, причем колебания, регистрируемые на барограммах и содарных эхограммах могут иметь различные периоды, а изменения амплитуд колебаний могут быть некоррелированы. Указанные расхождения свидетельствуют о значительном вкладе неоднородностей плотности воздуха, расположенных выше атмосферного пограничного слоя, в приземные колебания давления. Отмечена необходимость единой методики и измерительной аппаратуры для сопоставления климатологии ВГВ в различных местностях.
  - 3) По результатам обработки архивных данных содарного мониторинга 2008-2015 гг. на стационарном измерительном пункте в пригороде Москвы создан каталог волновых движений в АПС, включающий в себя данные о параметрах и метеорологических условиях для 993 эпизодов ВП и ВГСВ. Проведён анализ частоты повторяемости и параметров зарегистрированных периодических движений. Обнаружено, что ВГСВ наблюдались в среднем в 30% дней вне зависимости от сезона, а ВП в основном регистрировались в весенне-летний период в среднем в 4-8% дней. Показано, что в среднем ВГСВ имеют меньший период, чем ВП и наблюдаются при бóльших скоростях ветра.
  - 4) Разработана методика оценки степени влияния эпизодов волновой активности на характеристики турбулентности, основанная на сопоставлении значений этих характеристик в присутствии и в отсутствие волновой активности.. Сравнение средних значений характеристик до и после эпизода со значениями во время эпизода позволяет судить о сопутствующих волновой активности изменениях.
  - 5) Получены количественные оценки сопутствующих прохождению волн изменений структурной характеристики температуры  $C_T^2$  и дисперсии вертикальной компоненты скорости ветра  $\sigma_w^2$ , измеренных внутри волнового слоя. Характеристики были рассчитаны по данным содарных измерений для 8 эпизодов ВГСВ и 1 эпизода ВП, наблюдавшихся над однородной степью в летнее время. Рассчитанные коэффициенты волнового воздействия на параметр  $\sigma_w^2$  лежат в интервале 0.9÷1.9. В большинстве случаев значение  $\sigma_w^2$  меняется в пределах 30% и возвращается к начальному значению после прохождения волнового цуга. Показано, что коэффициенты волнового воздействия на параметр  $C_T^2$  значительно различаются для двух типов волн: 1.3÷12.2 для ВГСВ и ~ 700 для ВП.
  - 6) Получены количественные оценки изменений кинетической энергии возмущений  $ke$  и потока импульса  $mf$  во время прохождения 42 цугов ВГВ: 31 ВГСВ и 11 ВП. 3 эпизода



наблюдались над ровной степью, а 38 над слабо неоднородной сельской местностью. Для 27 из исследованных случаев была также проведена оценка изменений потоков тепла  $hf$ . Характеристики турбулентности рассчитывались по данным локальных измерений под слоем волновой активности. Показано, что 30 % цугов ВГСВ приводят к увеличению измеренных характеристик. В среднем коэффициенты воздействия составляют 2.4, 3.6 и 2.2 соответственно для  $ke$ ,  $mf$  и  $hf$ . Процент ВП, приводящих к увеличению потоков значительно выше, до 90%. Коэффициенты воздействия в среднем составляют 5.9, 5.3 и 4.9 соответственно для  $ke$ ,  $mf$  и  $hf$ , но в некоторых случаях могут принимать значения в несколько сотен. Абсолютные значения характеристик турбулентности в среднем близки для цугов ВП и ВГСВ. Обнаружено большое разнообразие полученных количественных оценок степени воздействия ВГВ на интенсивность турбулентного обмена, что согласуется с выводами модельных исследований о том, что даже небольшие изменения значений исходных метеорологических параметров кардинальным образом влияют на взаимодействие волн и турбулентности в устойчиво стратифицированном АПС. Полученные выводы находятся в согласии с опубликованными данными численных и натуральных экспериментов.

#### **Список трудов автора по теме диссертации.**

##### Публикации в изданиях, входящих в список ВАК и базы данных WoS и Scopus:

1. Зайцева Д. В., Каллистратова М.А., Люлюкин В.С., Кузнецов Р.Д., Кузнецов Д.Д. 2018: Воздействие внутренних гравитационных волн на флуктуации метеорологических параметров атмосферного пограничного слоя // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 54. – №. 2. – С. 195-205.
2. Каллистратова М. А., Петенко И.В., Кузнецов Р.Д., Куличков С.Н., Чхетиани О.Г., Чунчужов И.П., Люлюкин В.С., Зайцева Д.В., Вазаева Н.В., Кузнецов Д.Д., Перепёлкин В.Г., Буш Г.А. 2018: Содарное зондирование атмосферного пограничного слоя (обзор работ ИФА им. АМ Обухова РАН) // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 54. – №. 3. – С. 283-300.
3. Zaitseva D. V., Kouznetsov R. D. 2019: Observation of Kelvin-Helmholtz and propagating buoyancy waves in the Antarctic with the help of sodar and microbarograph // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 231. – №. 1. – 012054.
4. Lyulyukin V., Kallistratova M., Zaitseva D., Kuznetsov D., Artamonov A., Repina I., Petenko I., Kouznetsov R., Pashkin A. 2019: Sodar observation of the ABL structure and waves over the black sea offshore site // Atmosphere – 2019. – V. 10. – №. 12. – 811.
5. Чечин Д.Г., Артамонов А.Ю., Бодунков Н.Е., Живоглотов Д.Н., Зайцева Д.В., Калягин М.Ю., Кузнецов Д.Д., Кунашук А.А., Шевченко М.А., Шестакова А.А. 2021: Опыт исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя с помощью

- беспилотного летательного аппарата // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57. – №. 5. – С. 602-610.
6. Чунчужов И. П., Куличков С.Н., Попов О.Е., Перепёлкин В.Г., Зайцева Д.В., Сомсиков В.М. 2021: Волновые возмущения атмосферного давления и скорости ветра в тропосфере, связанные с солнечным терминатором // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57. – №. 6. – С. 665-679.
7. Zaitseva D., Kallistratova M., Lyulyukin V., Kouznetsov R., Kuznetsov D. 2022: On the influence of internal gravity waves on the intensity of turbulence in the atmospheric boundary layer // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – V. 1040 – 012034.
8. Lyulyukin V., Zaitseva D., Kuznetsov D., Repina I., Kallistratova M. 2022: Sodar observation of the breeze return currents over the coastal zone of the Black Sea // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022 – V. 1040 – 012036.

Статьи в сборниках:

9. Каллистратова М.А., Люлюкин В.С., Кузнецов Р.Д., Петенко И.В., Зайцева Д.В., Кузнецов Д.Д. 2017: Содарные исследования волн Кельвина-Гельмгольца в низкоуровневых струйных течениях // "Динамика волновых и обменных процессов в атмосфере". — М.: ГЕОС. — 2017. — 508 С. - С. 212-259.
10. Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Люлюкин В.С., Перепелкин В.Г., Кузнецов Р.Д., Кузнецов Д.Д., Буш Г.А. 2018: Внутренние гравитационные волны разных типов в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое по данным содара и микробарографа // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сборник трудов — М.: Физматкнига, 2018. — 587 С. — С.516-521.

Тезисы докладов:

11. Зайцева Д.В., Юшков В.П. 2015: « Структурные функции флуктуаций скорости звука в турбулентной атмосфере» // 19-я Международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Сборник тезисов докладов. – М.-Туапсе: ГЕОС. – 2015. – 127 С. – С.67.
12. Зайцева Д.В. 2017: Влияние внутренних гравитационных волн на развитие турбулентности в устойчиво-стратифицированном атмосферном пограничном слое // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы. Тезисы докладов XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых – Ярославль : Филигрань. – 2017. – 90 С. – С.55.
13. Зайцева Д.В., Каллистратова М.А. 2018: Измерения параметров волн в атмосферном пограничном слое содаром и микробарографом // Тезисы докладов XXIII международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» – М.: Издательство Московского университета. – 2018. – 127 с. – с.48.



14. Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Люлюкин В.С., Кузнецов Р.Д., Кузнецов Д.Д. 2020: Содарные исследования внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое и их влияние на обменные процессы // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы. Тезисы докладов XXIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых – Ярославль : Филигрань. – 2020. – 124 с. – с.80-81.
15. Vazaeva, N., Chkhetiani, O., Kurgansky, M., Kallistratova, M., Lyulyukin, V., Zaytseva, D. 2020: Statistical Characteristics of Thermal Convection Structures based on Acoustic Sounding Data // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2020. – P. 1061.
16. Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Крамар В.Ф., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д., Люлюкин В.С., Зайцева Д.В., Кузнецов Д.Д. 2020: Субмезомасштабные структуры в приземном слое атмосферы по данным минисодара высокого разрешения // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова. 10–12 ноября 2020 года. Сборник тезисов докладов. — М.: Физматкнига. – 2020. — 184 С. — С. 7.
17. Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Люлюкин В.С., Кузнецов Р.Д., Кузнецов Д.Д. 2020: О влиянии внутренних гравитационных волн разных типов на турбулентные характеристики в атмосферном пограничном слое // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова. 10–12 ноября 2020 года. Сборник тезисов докладов. — М.: Физматкнига. – 2020. — 184 С. — С. 143.
18. Люлюкин В.С, Каллистратова М.А., Кузнецов Д.Д., Зайцева Д.В. 2020: Содарные наблюдения бризовой циркуляции в прибрежной зоне Черного моря // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова. 10–12 ноября 2020 года. Сборник тезисов докладов. — М.: Физматкнига – 2020.— 184 С. — С. 146.

### Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. профессору Каллистратовой Маргарите Александровне; д.ф.-м.н. профессору Репиной Ирине Анатольевне, д.ф.-м.н. Куличкову Сергею Николаевичу и д.ф.-м.н. Чхетиани Отто Гурамовичу за организацию полевых измерений, использованных в работе; к.ф.-м.н. Кузнецову Ростиславу Дмитриевичу, к.ф.-м.н. Люлюкину Василию Сергеевичу и Кузнецову Дмитрию Дмитриевичу за предоставление доступа к данным их содарных и микрометеорологических измерений и помощь в их обработке и интерпретации; д.ф.-м.н. Чунчужову Игорю Петровичу и к.ф.-м.н. Перепёлкину Виталию Георгиевичу за проведение и обработку данных микробарографических измерений.

Диссертационная работа выполнялась в рамках плановых работ ИФА РАН, а также в

рамках проекта, поддержанного Российским научным фондом (проект № 21-17-00021).

### Список литературы.

1. Госсард Э.Э. Волны в атмосфере / Э.Э. Госсард, У Х. Хук. – М.: Мир, 1978. – 532 С.
2. Кузнецов Р. Д. Акустический локатор ЛАТАН-3 для исследований атмосферного пограничного слоя // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20. – №. 8. – С. 749-753.
3. Шакина Н.П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере / Н.П. Шакина – Л.:Гидрометеиздат, 1990. – 312 С.
4. Baklanov A. A., Grisgono B., Bornstein R., et al. The nature, theory, and modeling of atmospheric planetary boundary layers //Bulletin of the American Meteorological Society. – 2011. – Vol. 92. – №. 2. – P. 123-128.
5. Coulter R. L. A case study of turbulence in the stable nocturnal boundary layer //Boundary-Layer Meteorology. – 1990. – Vol. 52. – №. 1. – P. 75-91.
6. Durden D. J., Nappo C. J., Leclerc M. Y. et al. On the impact of wave-like disturbances on turbulent fluxes and turbulence statistics in nighttime conditions: a case study // Biogeosciences. – 2013. – Vol. 10. – №. 12. – P. 8433-8443.
7. Edwards J. M., Beljaars A.C.M., Holtag A.A.M. et al. Representation of boundary-layer processes in numerical weather prediction and climate models // Boundary-Layer Meteorology. – 2020. – Vol. 177. – №. 2. – PP. 511-539.
8. Jiang Q. Impact of Elevated Kelvin–Helmholtz Billows on the Atmospheric Boundary Layer //Journal of the Atmospheric Sciences. – 2021. – Vol. 78. – №. 12. – P. 3983-3999.
9. Nappo C.J. An introduction to atmospheric gravity waves. / Carmen J. Nappo – Amsterdam: Academic press, 2013. - 366 P.
10. Nappo C.J., Sun J., Mahrt L. et al. Determining wave–turbulence interactions in the stable boundary layer //Bulletin of the American Meteorological Society. – 2014. – Vol. 95. – №. 1. – ES11-ES13.
11. Sandu I., Beljaars A., Bechtold B. et al. Why is it so difficult to represent stably stratified conditions in numerical weather prediction (NWP) models? //Journal of Advances in Modeling Earth Systems. – 2013. – Vol. 5. – №. 2. – P. 117-133.
12. Sun J., Mahrt L., Banta R.M. et al. Turbulence regimes and turbulence intermittency in the stable boundary layer during CASES-99 // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2012. – Vol. 69. – №. 1. – P. 338-351.
13. Sun J., Nappo C. J., Mahrt L. et al. Review of wave-turbulence interactions in the stable atmospheric boundary layer // Reviews of geophysics. – 2015. – Vol. 53. – №. 3. – P. 956-993.
14. Tsiringakis A., Steeneveld G. J., Holtslag A. A. M. Small-scale orographic gravity wave drag in stable boundary layers and its impact on synoptic systems and near-surface meteorology // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2017. – Vol. 143. – №. 704. – P. 1504-1516.
15. Vercauteren N., Klein R. A clustering method to characterize intermittent bursts of turbulence and interaction with submesoscale motions in the stable boundary layer // Journal of the atmospheric sciences. – 2015. – Vol. 72. – №. 4. – P. 1504-1517.
16. Yang X. Atmospheric Acoustics / X. Yang. – Berlin\Boston: Science Press & De Gruyter GmbH, 2016. – 376 P.