

УДК 551.511.31

СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВОЛНООБРАЗНЫЕ СТРУКТУРЫ В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ И ИХ ПАРАМЕТРЫ ПО ДАННЫМ СОДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ПОДМОСКОВЬЕ

© 2023 г. Д. В. Зайцева^{а, *}, М. А. Каллистратова^а, В. С. Люлюкин^{а, с}, Р. Д. Кузнецов^б,
Д. Д. Кузнецов^а, Н. В. Вазаева^{а, с}

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., д. 3, Москва, 119017 Россия

^бФинский метеорологический институт, пл. Эрик Пальмен, 1, Хельсинки, FI-00101 Финляндия

^сМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1, Москва, 105005 Россия

*e-mail: zaycevadv@gmail.com

Поступила в редакцию 03.11.2022 г.

После доработки 07.02.2023 г.

Принята к публикации 10.03.2023 г.

В работе представлены результаты исследования параметров волнообразных структур на основе данных многолетнего непрерывного содарного мониторинга атмосферного пограничного слоя (АПС). Рассматриваются субмезомасштабные внутренние гравитационные волны (ВГВ) неорографического происхождения, захваченные в устойчиво-стратифицированном АПС (УАПС). Приводятся статистические данные о параметрах двух классов ВГВ: внутренних гравитационно-сдвиговых волн (ВГСВ) типа валов Кельвина-Гельмгольца (ВКГ) и волн плавучести (ВП). Идентификация и классификация ВГВ производилась путем визуального анализа содарных эхограмм. Были использованы данные измерений, проводимых в сельской местности в Подмосковье. Были исследованы сезонная и суточная изменчивость частоты регистрации волн обоих классов, проанализированы значения параметров наблюдавшихся волн, а также проведено сопоставление диапазонов и средних значений этих величин.

Ключевые слова: содар, устойчиво-стратифицированный атмосферный пограничный слой, внутренние гравитационные волны, валы Кельвина-Гельмгольца, волны плавучести

DOI: 10.31857/S0002351523030100, EDN: TRRLDT

1. ВВЕДЕНИЕ

В атмосферном пограничном слое (АПС) регулярно наблюдаются субмезомасштабные внутренние гравитационные волны (ВГВ). Колебания с периодами от десятка секунд до десятков минут регистрируются во временных рядах метеорологических величин (ветра, температуры, давления), измеренных *in situ* на различных высотных уровнях с помощью стандартных метеорологических мачт [Sun et al., 2015; Viana et al., 2009; Чунчузов и др., 2021], либо высотных метеорологических башен [Бызова и др., 1989]. Квазипериодические колебания высоты расположения турбулизированных слоев обнаруживаются в поле эхо-сигналов наземных дистанционных средств зондирования атмосферы, таких как радары [Fukao et al., 2011], содары [Petenko et al., 2016] и лидары [Banakh et al., 2020]. Такие колебания обычно тоже интерпретируются как проявление ВГВ. Исследованию свойств одного или нескольких эпизодов волновой активности в АПС посвящено большое коли-

чество работ (см., например, ссылки в обзоре [Sun et al., 2015]); однако, можно найти всего несколько публикаций, содержащих статистический анализ частоты появления и параметров волн в АПС (например, [Rees et al., 2000; Люлюкин и др., 2015; Mayot, 2017]).

Наблюдавшиеся нами ВГВ неорографического происхождения, захваченные статически устойчивым АПС (УАПС), можно разделить на два класса по механизму их генерации и их свойствам (см. например, [Sun et al., 2015b; Госсард и Хук, 1978; Нарро, 2013]). К первому классу относятся внутренние гравитационно-сдвиговые волны (ВГСВ), ко второму — волны плавучести (ВП).

ВГСВ — возмущения, возникающие в термически стратифицированном потоке при наличии значительного вертикального градиента скорости ветра. В таких условиях ВГСВ могут генерироваться в виде нелинейных растущих мод вследствие динамической (сдвиговой) неустойчивости потока. На содарных эхограммах регулярно на-

блюдаются субмезомасштабные структуры класса ВГСВ, имеющие форму “шнуров”, “вихрей” и “кошачьих глаз”. Многочисленные примеры таких структур можно найти в работе [Люлюкин и др., 2015]. Подобные вихреобразные движения часто называют валами (либо волнами) Кельвина–Гельмгольца. 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. В данной работе для обозначения структур подобного типа используется более общий термин – ВГСВ.

ВП – возмущения, возникающие в термически стратифицированном потоке при небольшом изменении скорости по вертикали (т.е. при слабой завихренности течения) и значительных вертикальных градиентах температуры. ВП образуются при вертикальном смещении устойчивых слоев вследствие огибания орографических препятствий, а также и над однородной поверхностью – вследствие наличия внешнего форсинга. В условиях, исследуемых в работе, в качестве возбудителя ВП чаще всего выступали метеорологические фронты (см., напр., [Куличков и др., 2017]).

Критерии, определяющие возможность генерации ВГВ, приведены в классических монографиях [Госсард и др., 1978; Нарро, 2013]. Согласно линейной теории для случая термически стратифицированного течения с постоянным по высоте ветром, генерация ВГВ или их захват в слое возможны при условии, что частота волны не превышает значения

частоты Брента–Вайсяля $N = \sqrt{\frac{g}{t} \left(\frac{dt}{dz} + \gamma_a \right)}$, где g – ускорение свободного падения, t – средняя температура в слое, dt/dz – вертикальный градиент температуры, $\gamma_a = 0.0098 \text{ K м}^{-1}$ – сухоадиабатический градиент температуры. Для стратифицированного сдвигового течения общепринятым необходимым условием возможности возникновения сдвиговой неустойчивости с образованием волн является условие: $Ri < Ri_{кр}$, где $Ri = N^2/(dU/dz)^2$ – число Ричардсона, dU/dz – вертикальный сдвиг ветра. Согласно общеизвестной теореме о полужирности Майлса–Говарда, критическое число Ричардсона $Ri_{кр} = 0.25$. Впрочем, в недавней теоретической работе [Kurgansky, 2022] была продемонстрирована возможность возникновения неустойчивости и при более высоких значениях Ri , что ставит под сомнение однозначность обобщенного решения теоремы Майлса–Говарда.

Отметим, что достаточных условий для образования ВГВ до настоящего времени не сформулировано. Таким образом, критериев для предсказания возникновения ВГВ в атмосфере пока нет.

Волновые движения могут оказывать заметное влияние на динамику и структуру устойчиво стратифицированного АПС (УАПС). Это подтверждается натурными [Sun et al., 2015a; Зайцева и др., 2018], численными [Jiang, 2021] и лабораторными экспериментами [Thorpe, 1973]. Отсюда следует необходимость изучения климатологической статистики ВГВ.

Целью настоящей работы является исследование частоты повторяемости и параметров волн с различной вертикальной структурой. Для этого были использованы многолетние непрерывные измерения, проводившиеся при помощи акустического лоатора (содара) в Московской области, на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы (ИФА).

2. ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

2.1. Проведение измерений

Звенигородская научная станция (ЗНС) находится в Московской области, в 50-ти км к западу от Москвы, в слабо-неоднородной лесистой местности. Вблизи ЗНС расположено несколько малоэтажных зданий и шоссе. С 2008 года на ЗНС проводился непрерывный мониторинг АПС при помощи исследовательского содара серии ЛАТАН-3, разработанного в ИФА [Кузнецов, 2007]. Доплеровский трехантенный содар ЛАТАН-3 работал в моностатическом режиме на несущей частоте 2 кГц. Содар измерял вертикальные профили интенсивности эхо-сигнала, пропорциональной структурной характеристике температуры, и профили 3-х компонент скорости ветра. Измерения производились в диапазоне высот от 20 до 780 м с шагом 20 м по высоте и 20 с по времени. Точность измерения горизонтальных компонент скорости ветра составляла $\pm 0.5 \text{ м/с}$, а вертикальной компоненты – $\pm 0.1 \text{ м/с}$.

В работе были также использованы данные микроволнового температурного профилера МТР-5, в соответствии с методикой, разработанной в ФГБУ “ЦАО” и ФГБУ “Гидрометцентр РФ” [Кадыгров и др., 2015]. Профилимер измерял профили температуры в диапазоне высот от 0 до 600 м с разрешением 50 м по высоте и 5 мин по времени. Эти профили привлекались для анализа влияния температурной стратификации АПС на генерацию волн того или иного класса, ВГСВ либо ВП (см. последнюю строку табл. 1). Кроме того, профили температуры совместно с содарными профилями средней скорости ветра позволяли получать количественную оценку параметра устойчивости – градиентного числа Ричардсона.

Таблица 1. Средние значения параметров цугов волн и внешних условий

Сезон	I январь—апрель	II май—август	III сентябрь—декабрь	II май—август
Класс ВГВ	ВГСВ			ВП
* $h_{\min}$, м	120 ± 10	130 ± 10	130 ± 10	120 ± 10
$h_{\max}$, м	370 ± 10	350 ± 10	390 ± 10	530 ± 30
dh , м	230 ± 10	200 ± 10	250 ± 10	400 ± 30
T , мин	3.8 ± 0.2	3.2 ± 0.2	3.9 ± 0.2	8.5 ± 0.9
$U_{\max}$, м/с	12.3 ± 0.4	10.0 ± 0.4	12.6 ± 0.4	6.0 ± 0.7
dU/dz , м/с на 100 м	4.2 ± 0.2	3.8 ± 0.2	4.2 ± 0.2	2.3 ± 0.4
dI , дБ	7.9 ± 0.3	7.9 ± 0.3	7.9 ± 0.3	13.2 ± 1.2
$t_{\max}$, °C	-2.7 ± 0.9	16.6 ± 0.6	5.3 ± 0.8	16.1 ± 2.0
dt/dz , К/м на 100 м	0.19 ± 0.08	0.19 ± 0.07	0.18 ± 0.06	0.42 ± 0.15

* Обозначения параметров как на рис. 3.

При этом отметим, что качественная характеристика типа термической стратификации АПС (неустойчивая, нейтральная, устойчивая) определялась визуально по содарным эхограммам, поскольку ранее, на основе мирового опыта использования систем акустического зондирования, были разработаны методики сопоставления форм содарного эхо-сигнала с типом стратификации и вертикальной структурой АПС (см., например, [Russel et al., 1978; Pekour et al., 1993]).

Градиентное число Ричардсона Ri служило критерием степени устойчивости АПС. В приземном слое Ri рассчитывалось по данным измерений средней скорости ветра и температуры на двух высотах с помощью акустических термометров-анемометров (соников) марки USA-1. Соники находились на верхушках двух мачт высотой 6 м и 56 м, которые располагались рядом друг с другом на удалении 100 м от содара. Вертикальные профили Ri в АПС рассчитывались по содарным данным о скорости ветра и данным температурного профилимера МТР-5.

В работе были проанализированы данные измерений 2008–2015 гг. Содарные данные были доступны для 95% календарного времени.

2.2. Метод регистрации волнообразных структур

Для идентификации и классификации волнообразных структур проводился визуальный анализ содарных эхограмм. Автоматическая идентификация при помощи машинного обучения может успешно применяться (например, [Камардин и др., 2014]), но требует предварительного составления обучающей выборки для структур опреде-

ленной формы. На сегодняшний день визуальный анализ, несмотря на его некоторую субъективность, представляется более простым и надежным способом идентификации (в том числе и из-за разнообразия форм и размеров наблюдаемых структур), и применяется повсеместно (см., например, [Russel et al., 1978; Petenko et al., 2012]).

Из квазипериодических структур, регистрируемых на эхограммах, отбирались эпизоды двух классов, относимые либо к ВГСВ, либо к ВП. Для того, чтобы произвести такое разделение, проводился анализ вертикальной формы волновых цугов на высотнo-временных развертках интенсивности эхо-сигнала I и вертикальной скорости w .

Эпизоды ВГСВ регистрируются на эхограммах (в высотнo-временной развертке интенсивности эхо-сигнала I) в форме валов, кос, или, чаще всего, наклонных полос (см., например, [Люлюкин и др., 2015]). Такие эпизоды обычно наблюдаются при значительных вертикальных сдвигах скорости ветра в низкоуровневых струйных течениях. Примеры ВГСВ на содарных эхограммах представлены на рис. 1.

Эпизоды ВП идентифицируются на эхограммах по синусообразным колебаниям высоты расположения турбулизированных слоев (слоев с повышенной интенсивностью эхо-сигнала). ВП могут наблюдаться по изменениям высоты верхней границы приземного турбулизированного слоя (рис. 2а и 3б), а также по вертикальным колебаниям расположения одного или нескольких поднятых турбулизированных слоев (рис. 2б). В случае многослойных колебаний вертикальные движения разных слоев синхронны. Кроме того, волнам плавучести сопутствуют колебания вертикальной скорости ветра w . Осцилляции w на

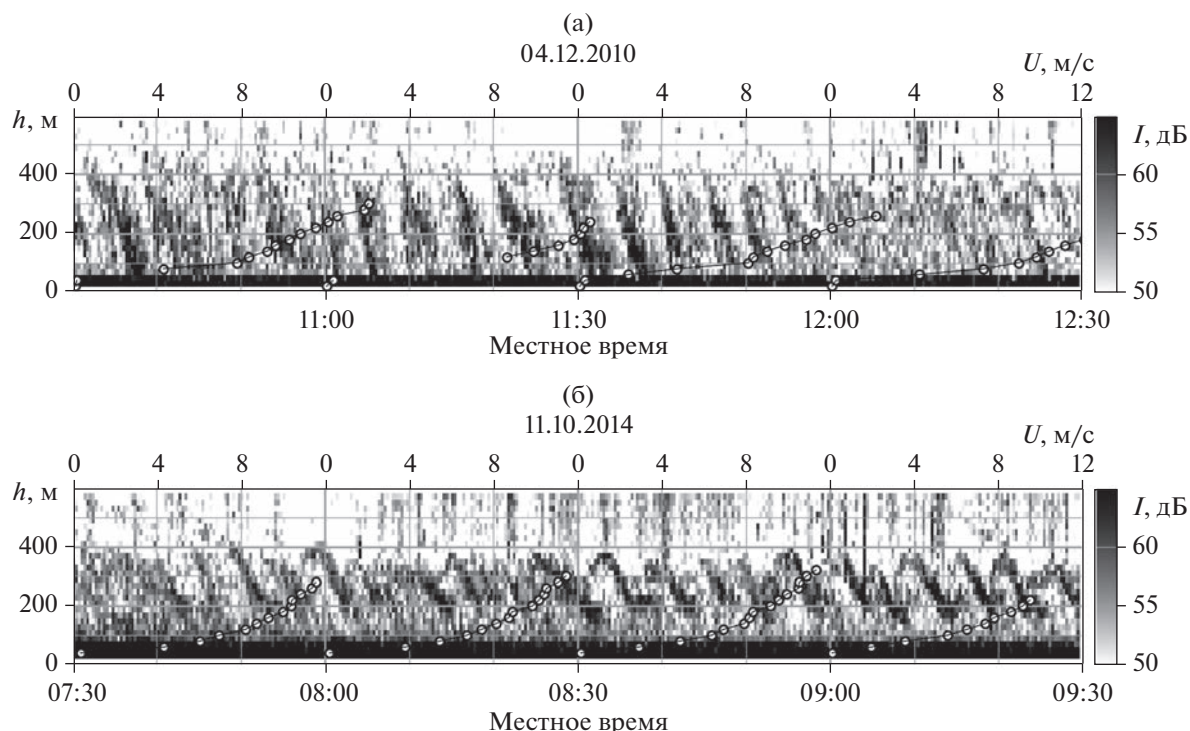


Рис. 1. Примеры регистрации цугов ВГСВ на содарных эхограммах (а) в форме наклонных полос и (б) в форме кос. По оси абсцисс внизу панели отложено локальное время, по оси ординат — высота. Степень почернения отражает интенсивность эхо-сигнала I , шкала почернения в децибелах приведена справа. Кругами показаны профили горизонтальной скорости ветра U , шкала скорости отложена по оси абсцисс в верхней части панели. В представленных примерах (а) и (б) высотные изменения скорости ветра dU достигают в пределах слоя волновой активности значений $dU \sim 12$ м/с.

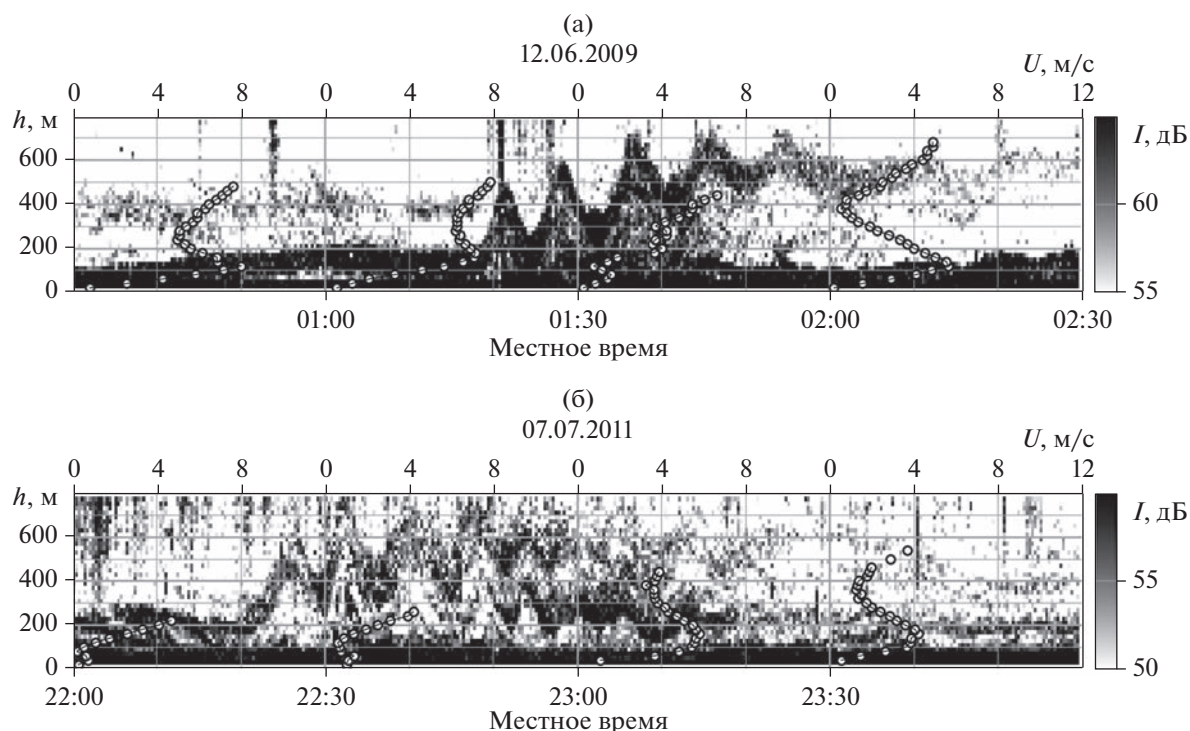


Рис. 2. То же, что на рис. 1 для цугов ВП. (а) колебания высоты расположения приподнятого инверсионного слоя и (б) многослойные колебания.

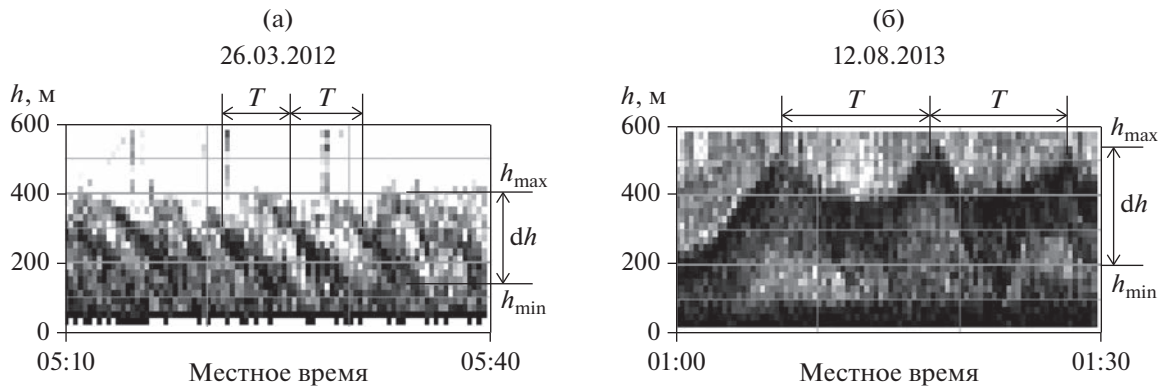


Рис. 3. Схема определения некоторых параметров цугов (а) ВГСВ и (б) ВП. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат — высота. Степень почернения отражает интенсивность эхо-сигнала. $h_{\min}$, $h_{\max}$ и dh — высоты расположения нижней и верхней границ слоя волновой активности и толщина этого слоя, соответственно; T — период волнообразных структур.

разных высотах приблизительно синфазны внутри всего слоя, охваченного волновыми движениями. Вертикальная скорость направлена вверх перед гребнями волновых движений слоя и вниз перед ложбинами. Это наглядно показано в работе [Petenko et al., 2012]. Чтобы убедиться, что регистрируемые эпизоды соответствуют условиям их захвата в УАПС, для каждого эпизода производилось сравнение частот наблюдаемых колебаний с частотой Брента–Вяйсяля N.

На рис. 3 представлена схема определения некоторых параметров волн для эпизодов ВГСВ и ВП. Сопутствующие условия — наибольшая скорость ветра и температура в волновом слое, а также их вертикальные градиенты — определялись соответственно по измерениям вертикальных профилей скорости ветра содаром и вертикальных профилей температуры профилемером.

Содар в режиме непрерывного мониторинга АПС обеспечивал данные с разрешением 20 с по времени (цикл зондирования) и 20 м по высоте. В соответствии с разрешающей способностью прибора в работе исследовались волновые структуры с периодом $T \geq 2$ мин и толщиной волнового слоя $dh \geq 60$ м. Более мелкомасштабные структуры исключались из рассмотрения в связи с низкой достоверностью определения их параметров.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Частота наблюдения волнообразных движений в разные месяцы

С июня 2008 г. по декабрь 2015 г. нами было зарегистрировано около 900 цугов ВГСВ и около 100 цугов ВП. Для каждого месяца были рассчитаны: 1) количество зарегистрированных эпизодов; 2) доля дней, в которые наблюдались эпизоды волновой активности. На рис. 4 представлены

диапазоны изменений и средние значения этих величин для двух классов волн.

В различные месяцы регистрировалось от 2 до 23 цугов ВГСВ, доля дней с такими эпизодами составляла от 6 до 67% дней месяца, а доля времени (не показана) — от 0 до 10% полного времени суток. Средние по всем годам значения менялись от месяца к месяцу от 8 до 13 эпизодов, от 24 до 35% количества дней и от 1 до 3% времени суток, соответственно. Различия между индивидуальными среднемесячными значениями оказались велики, однако, в среднем за все годы волны регистрировались ~30% дней вне зависимости от сезона. Сильная межгодовая изменчивость соответствует выводам [Люлюкин и др., 2015], полученным на основе анализа двух лет измерений на ЗНС, и подтверждает превалирующее влияние синоптических условий на вероятность наблюдения ВГСВ [Люлюкин и др., 2018]. Дальнейший анализ повторяемости наблюдений ВГСВ проводился с учетом разделения на три сезона: I — с января по апрель, II — с мая по август, III — с сентября по декабрь.

В разные месяцы регистрировалось от 0 до 6 эпизодов ВП, доля дней менялась от 0 до 17%, доля времени (не показана) не превышала 1%. Почти 90% эпизодов были зарегистрированы в период с апреля по август. В среднем в эти месяцы регистрировалось 1–2 эпизода, в 4–8% дней.

На рис. 5 представлена частота регистрации ВГВ в разное время суток. Для ВГСВ расчеты были проведены отдельно для каждого из сезонов. Для ВП был проведен анализ только для сезона II (с мая по август), во время которого было зарегистрировано большинство эпизодов.

Во всех сезонах наблюдалось увеличение частоты регистрации ВГСВ между 6 и 10 ч утра. Это соответствует времени утреннего подъема при-

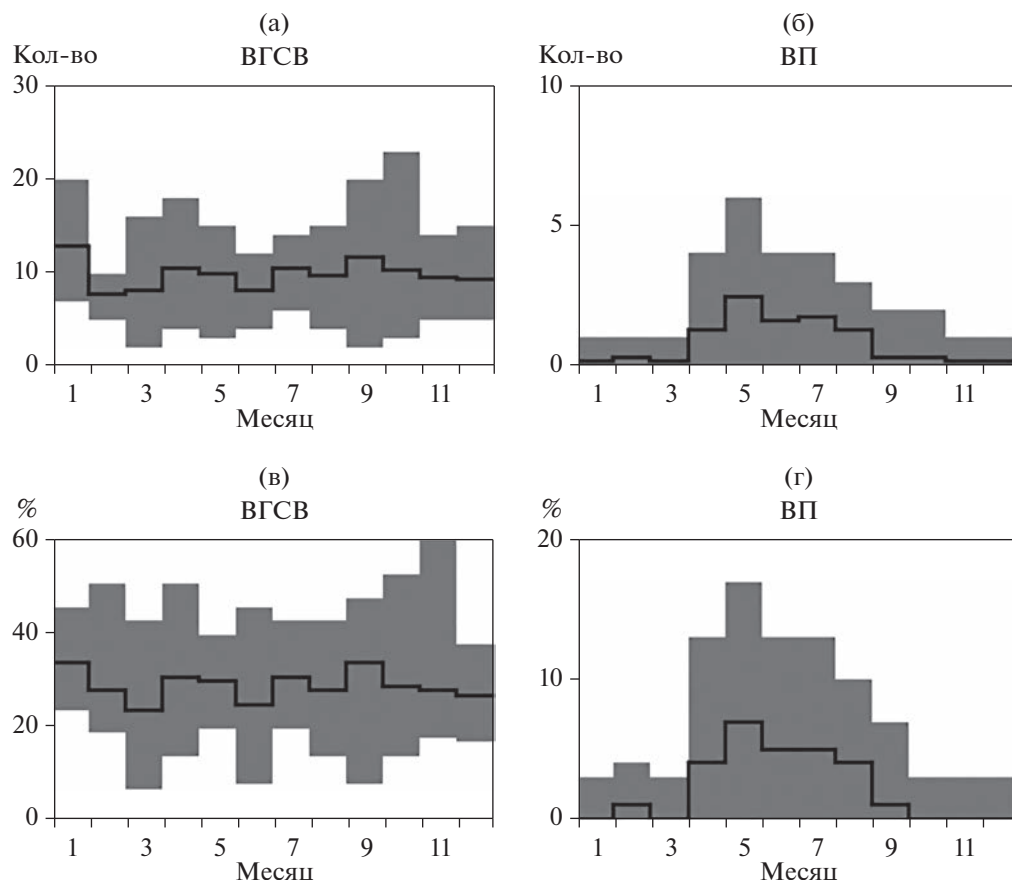


Рис. 4. Распределения по месяцам параметров частоты регистрации (а, в) цугов ВГСВ и (б, г) цугов ВП с периодами более 2-ух минут и двойной амплитудой более 60 м. (а, б) количество волновых эпизодов, зарегистрированных за месяц. (в, г) процент дней с зарегистрированными цугами волн от общего количества дней измерений. Закрашенная область соответствует диапазону между наименьшим и наибольшим значениями. Черной линией показано среднее за 2008–2015 гг. значение. По оси абсцисс на всех панелях отложен порядковый номер месяца.

земного инверсионного слоя и возникновения под ним условий для развития конвекции. Конвективные термики могут запускать механизм генерации ВКГ в поднимающемся сдвиговом устойчиво стратифицированном слое [Kallistratova et al., 2019]. Днем ВГСВ наблюдались реже, чем ночью. С мая по август (сезон I) ВГСВ очень редко регистрировались в дневное время, а с сентября по апрель (сезоны I и III) немного чаще. Более высокая частота регистрации дневных ВГСВ в сезонах I и III связана с возможностью длительного существования устойчивой термической стратификации и низкоуровневых струйных течений (НСТ) в это время года [Kallistratova et al., 2013]. Во второй половине ночи ВГСВ регистрировались немного чаще, чем в первой. Это может быть связано с тем, что в первой половине ночи, как правило, приземный слой перемешивания и НСТ только начинают формироваться. Эпизоды ВП также регистрировались в основном в ночное

время, однако максимум частоты приходится на 0–2 ч ночи, а не на утренние часы.

Отметим, что количество наблюдаемых эпизодов и их длительность заметно возрастает с увеличением разрешающей способности содара. На рис. 6 представлен пример сравнения эхограмм, синхронно полученных при помощи содаров с разным разрешением. На панели (а) показаны содарные измерения с шагом 20 секунд по времени и 20 м по высоте, на панели (б) — измерения, выполненные минисодаром с шагом 3 с и 10 м, соответственно. Так, на рис. 6(а) четко различимы структуры в форме наклонных полос в промежутке 23:00–23:15. На рис. 6(б) эти же структуры можно наблюдать начиная с 22:55 и до 23:30. Более того, становятся различимы изменения толщины слоя волновой активности со временем (в промежутке 23:00–23:15), а также колебания с меньшим периодом (после 23:15).

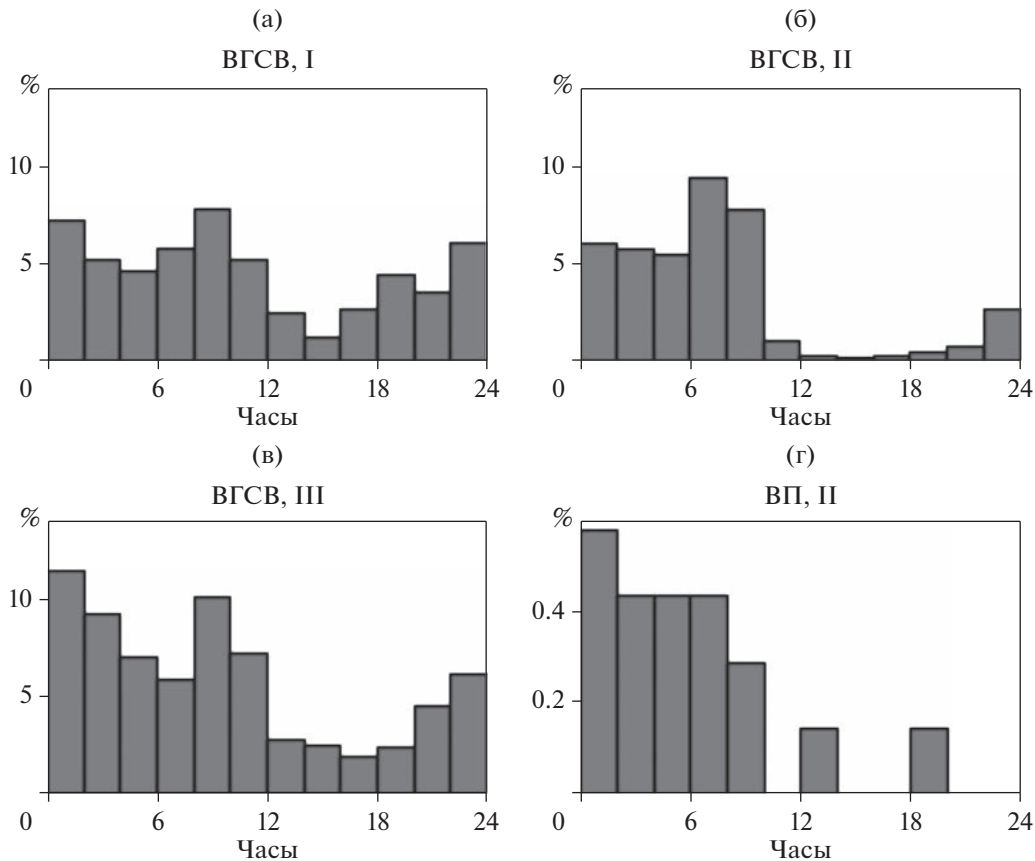


Рис. 5. Частота регистрации цугов ВГСВ (а–в) и цугов ВП (г) в разное время суток. По оси абсцисс отложены часы, по оси ординат — процент случаев, в которых наблюдались эпизоды волновой активности. (а, в) рассчитаны соответственно по данным для сезонов I (январь–апрель) и III (сентябрь–декабрь). (б, г) рассчитаны по данным для сезона II (май–август). Ширина каждого столбца равна 2 ч.

3.2. Параметры волнообразных движений

Параметры цугов волн и внешние условия для ВГСВ были проанализированы отдельно для трех сезонов. Для случаев ВП был рассмотрен только сезон II. На рис. 7, 8 представлены частотные распределения. В табл. 1 перечислены средние значения с 95-процентными доверительными интервалами.

Для каждого исследованного цуга были определены следующие параметры: нижняя и верхняя границы, а также толщина слоя волновой активности ($h_{\min}$, $h_{\max}$, dh); период колебаний (T); наибольшая горизонтальная скорость ветра и температура ($U_{\max}$ и $t_{\max}$); средние по волновому слою вертикальный сдвиг ветра и градиент температуры (dU/dz и dt/dz); глубина модуляции эхо-сигнала (dI).

Для цугов ВГСВ частотные распределения и средние значения некоторых представленных величин схожи во всех трех сезонах. Это относится к нижней и верхней границам слоя волновой активности ($h_{\min}$ и $h_{\max}$), вертикальному сдвигу скорости ветра (dU/dz) и градиенту температуры

(dt/dz). Период T , толщина волнового слоя dh и скорость ветра $U_{\max}$ в случаях ВГСВ, зарегистрированных с мая по август (сезон II), оказались немного меньше, чем в другие месяцы. Таким образом, в летнее время волны с меньшими периодом и высотным размахом наблюдались на эхограммах чаще, чем в оставшееся время года.

Распределение толщины волнового слоя dh цугов ВП (рис. 8(а)) имеет два максимума — 220–280 и 400–460 м. В распределении сдвига ветра (рис. 8(г)) также присутствуют два пика, соответствующие значениям 0–1 и 3–4 м/с на 100 м, причем второй пик совпадает с модами сдвига ветра в присутствии ВГСВ. Это связано с тем, что такие значения сдвига ветра наблюдаются на ЗНС чаще других значений [Люлюкин и др., 2015].

Значения параметров и условий, сопутствующих наблюдению цугов разных классов, лежат в широком диапазоне. Соответственно, эпизоды ВГСВ и ВП могут иметь одинаковые параметры. В среднем же ВП имеют толщину волнового слоя dh , период колебаний T и глубину модуляции dI значительно больше, чем ВГСВ. Средние значе-

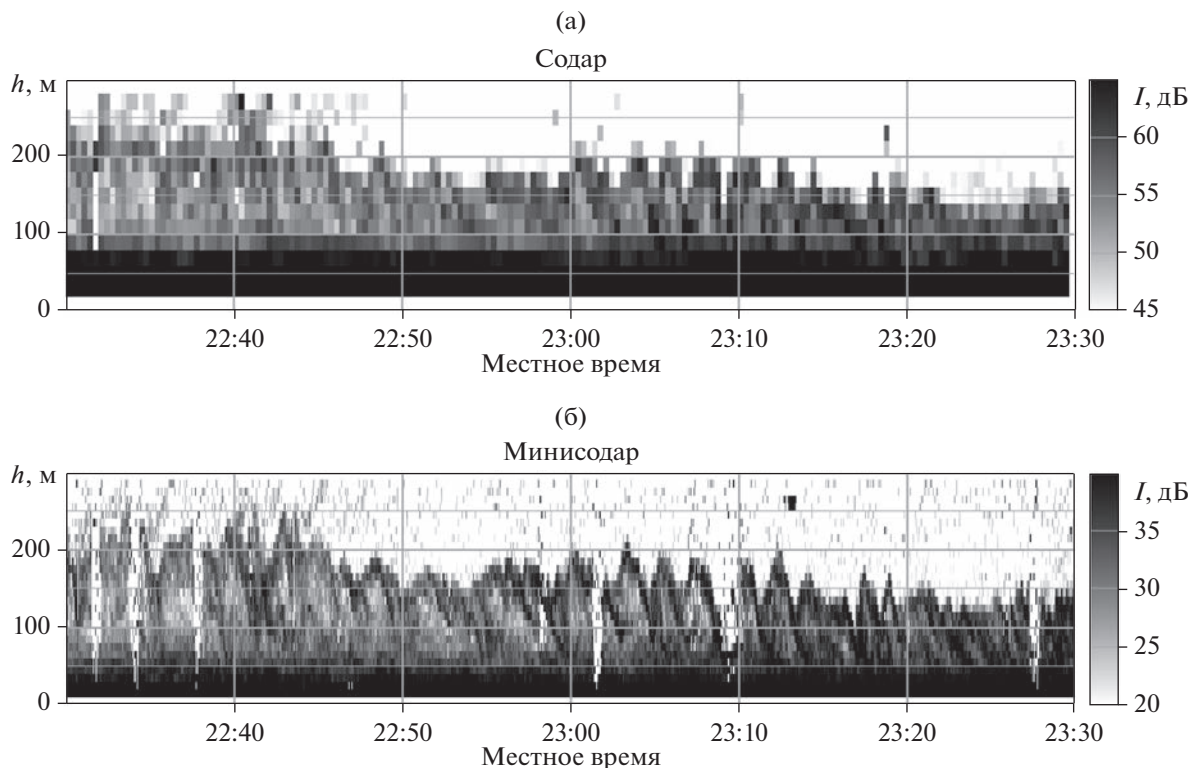


Рис. 6. Эхограммы, полученные при синхронных измерениях с различными высотным и временным разрешениями. ЗНС, 28 июля 2022.

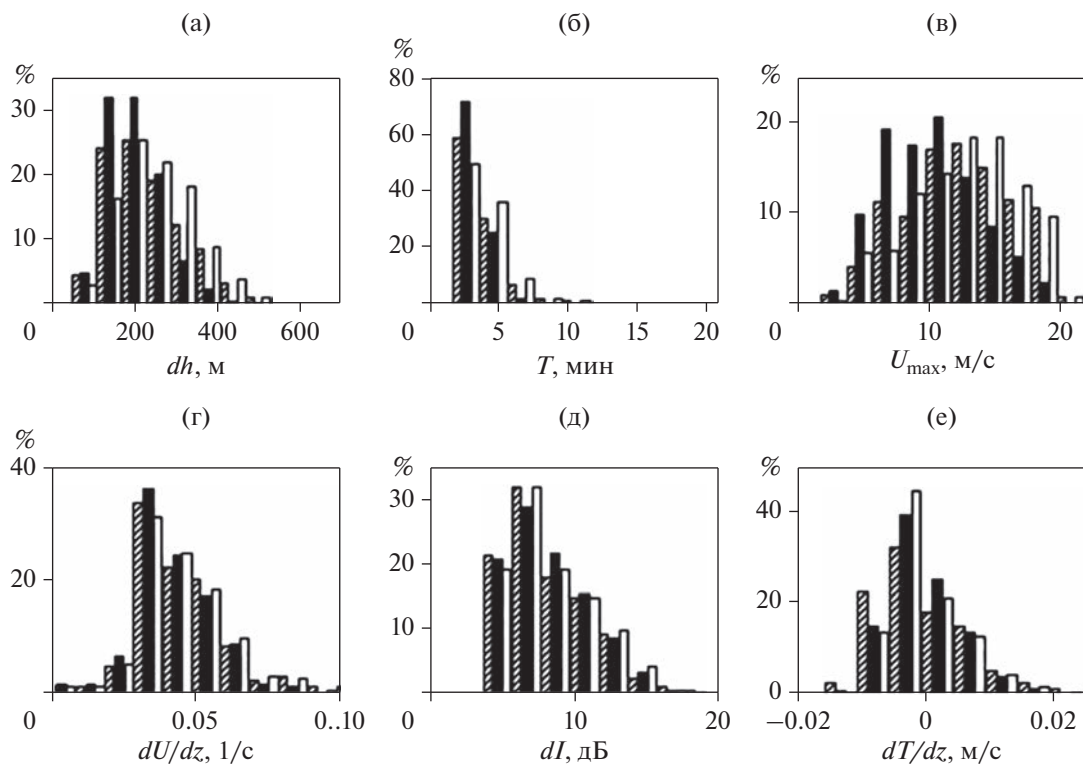


Рис. 7. Частотные распределения параметров цугов ВГСВ. Заштрихованные столбцы для сезона I (январь–апрель), черные — для сезона II (май–август), белые — для сезона III (сентябрь–декабрь). (а) Толщина волнового слоя dh ; (б) период волновых структур T ; (в) наибольшая скорость ветра внутри волнового слоя $U_{\max}$; (г) сдвиг ветра dU/dz ; (д) глубина модуляции эхо-сигнала dI ; (е) градиент температуры dt/dz .

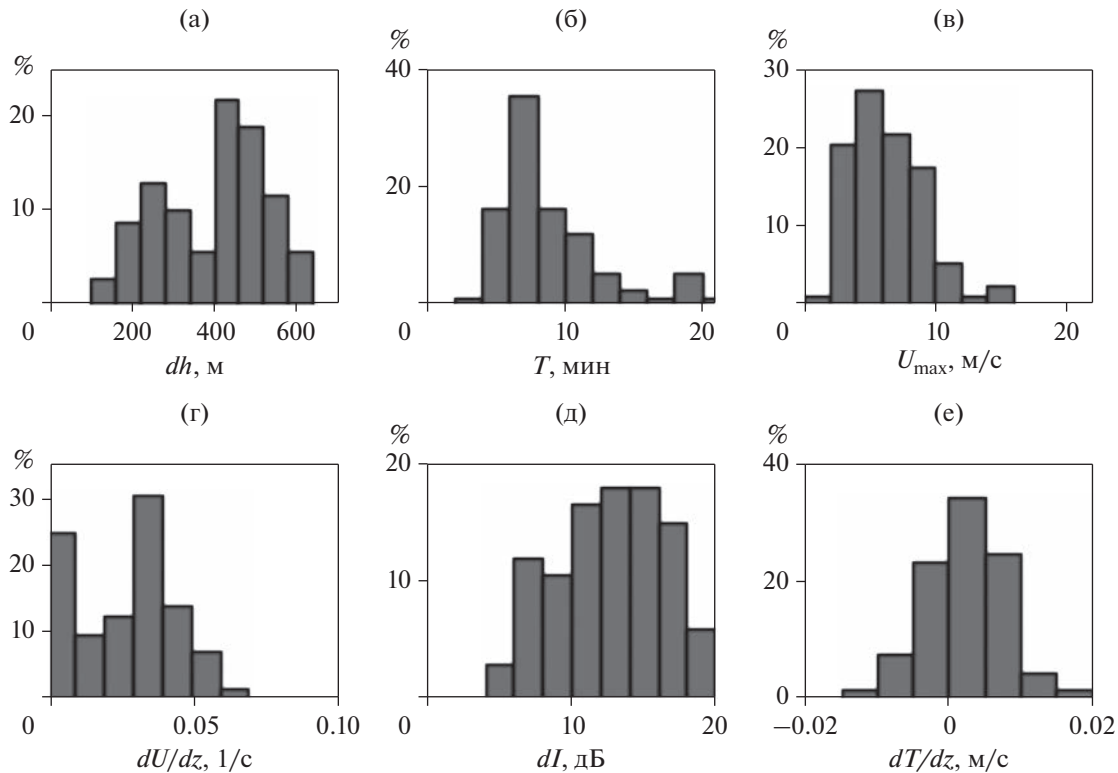


Рис. 8. Частотные распределения параметров цугов ВП.

ния сдвига ветра dU/dz и градиента температуры dT/dz , сопутствующих прохождению цугов волн, также различны для ВП и ВГСВ.

Коэффициенты линейной корреляции r пар параметров и ВГСВ, и ВП оказались высокими только для пар явно связанных величин, например, $U_{\max}$ и dh , $U_{\max}$ и dU/dz . Для других пар корреляция оказалась низкой, $r < 0.48$.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным длительных непрерывных содарных измерений проводившихся на Звенигородской научной станции в Московской области, было зарегистрировано около 1000 эпизодов волновой активности в УАПС, относящихся к двум классам внутренних волн: внутренние гравитационно-сдвиговые волны (ВГСВ) и волны плавучести (ВП).

Для этих эпизодов были проанализированы частота повторяемости и параметры цугов волн, а также сезонная и суточная изменчивость частоты наблюдения. Показано, что ВП регистрируются, в основном, в весенне-летний период, с апреля по август (90% всех эпизодов). При большой месячной и годовой изменчивости количества эпизодов ВГСВ, средние значения доли дней с волновой активностью для многолетних измерений составляют ~30% вне зависимости от сезона. Этот

факт подтверждает превалирующее влияние синоптических условий на вероятность наблюдения ВГСВ [Люлюкин и др., 2018]. Большая часть волновых эпизодов обоих классов регистрируется в середине ночного времени, однако максимум частоты регистрации ВГСВ приходится на утренние часы, соответствующие утреннему подъему инверсии, а максимум частоты ВП — на 0–2 ч ночи. Были исследованы различия параметров волн и внешних условий, сопутствующих их наблюдению, между разными сезонами и разными классами волн. Показано, что диапазон значений параметров волн обоих классов широк и перекрывается. В среднем же, в летнее время ВГСВ с меньшими периодом и высотным размахом наблюдались на эхограммах чаще, чем в остальное время года. Средние значения периодов и высотного размаха ВП заметно выше, чем те же параметры ВГСВ. В среднем условия наблюдения также различны для двух классов волн: ВГСВ наблюдались при больших сдвигах ветра и меньших градиентах температуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых-кандидатов наук (проект № МК-5516.2022.1.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер А.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 263 с.
- Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
- Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Люлюкин В.С. 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.
- Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгопрудный: Физматкнига, 2015. 171 с.
- Камардин А.П., Одинцов С.Л., Скороходов А.В. Идентификация внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое по данным содара // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 9. С. 812–818.
- Кузнецов Р.Д. Акустический локатор ЛАТАН-3 для исследований атмосферного пограничного слоя // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 8. С. 749–753.
- Куличков С.Н., Цыбульская Н.Д., Чунчузов И.П. и др. Исследования внутренних гравитационных волн от атмосферных фронтов в московском регионе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 455–469.
- Люлюкин В.С., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д. и др. Внутренние гравитационно-сдвиговые волны в атмосферном пограничном слое по данным акустической локации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 218–229.
- Люлюкин В.С., Каллистратова М.А., Крамар В.Ф. и др. О барических системах, благоприятствующих возникновению гравитационно-сдвиговых волн в АПС // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сборник трудов. М., 2018. С. 559–563.
- Чунчузов И.П., Куличков С.Н., Попов О.Е. и др. Волновые возмущения атмосферного давления и скорости ветра в тропосфере, связанные с солнечным терминатором // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 6. С. 665–679.
- Banakh V.A., Smalikho I.N., Falits A.V. Wind–Temperature Regime and Wind Turbulence in a Stable Boundary Layer of the Atmosphere: Case Study // Remote Sens. 2020. V. 12. № 6. P. 955.
- Fukao S., Luce H., Mega T. et al. Extensive studies of large-amplitude Kelvin–Helmholtz billows in the lower atmosphere with VHF middle and upper atmosphere radar // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. № 657. P. 1019–1041.
- Jiang Q. Impact of Elevated Kelvin–Helmholtz Billows on the Atmospheric Boundary Layer // J. Atm. Sci. 2021. V. 78. № 12. P. 3983–3999.
- Kallistratova M.A., Kouznetsov R.D., Kramar V.F. et al. Profiles of wind speed variances within nocturnal low-level jets observed with a sodar // J. Atmos. Ocean. Technol. 2013. V. 30. № 9. P. 1970–1977.
- Kallistratova M.A., Petenko I.V., Kouznetsov R.D. et al. Kelvin–Helmholtz billows in rising morning inversions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 231. № 1. P. 012025.
- Kurgansky M.V. On short-wave instability of the stratified Kolmogorov flow // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 2022. T. 36. № 4. С. 575–595.
- Mayor S.D. Observations of microscale internal gravity waves in very stable atmospheric boundary layers over an orchard canopy // Agric. For. Meteorol. 2017. V. 244. P. 136–150.
- Nappo C.J. An introduction to atmospheric gravity waves. Amsterdam–Boston–Heidelberg: Elsevier Inc., 2013. 359 p.
- Pekour M. S., Kallistratova M.A., Lokoschenko M.A. et al. Acoustic sounding study of the mixing layer over a city // CIS Selected Papers: Optical Monitoring of the Environment. SPIE, 1993. V. 2107. P. 169–193.
- Petenko I., Mastrantonio G., Viola A. et al. Wavy vertical motions in the ABL observed by sodar // Boundary-Layer Meteorol. 2012. V. 143. № 1. P. 125–141.
- Petenko I., Argentini S., Casasanta G. et al. Wavelike structures in the turbulent layer during the morning development of convection at Dome C, Antarctica // Boundary-Layer Meteorol. 2016. V. 161. № 2. P. 289–307.
- Rees J.M., Denholm–Price J.C.W., King J.C. et al. A Climatological Study of Internal Gravity Waves in the Atmospheric Boundary Layer Overlying the Brunt Ice Shelf, Antarctica // J. Atm. Sci. 2000. V. 57. № 4. P. 511–526.
- Russell P.B., Uthe E.E. Regional patterns of mixing depth and stability: Sodar network measurements for input to air quality models // Bulletin of the American Meteorological Society. 1978. V. 59. № 10. P. 1275–1287.
- Sun J., Mahrt L., Nappo C. et al. Wind and temperature oscillations generated by wave–turbulence interactions in the stably stratified boundary layer // J. Atm. Sci. 2015. V. 72. № 4. P. 1484–1503.
- Sun J., Nappo C.J., Mahrt L. et al. Review of wave–turbulence interactions in the stable atmospheric boundary layer // Rev. Geophys. 2015. V. 53. № 3. P. 956–993.
- Thorpe S.A. Turbulence in stably stratified fluids: A review of laboratory experiments // Boundary-Layer Meteorol. 1973. V. 5. № 1. P. 95–119.
- Viana S., Yagüe C., Maqueda G. Propagation and effects of a mesoscale gravity wave over a weakly-stratified nocturnal boundary layer during the SABLES2006 field campaign // Boundary-Layer Meteorol. 2009. V. 133. № 2. P. 165–188.

Submeso Wave-Like Structures in the Atmospheric Boundary Layer and Their Parameters Measured with the Help of Sodar in Moscow Region

D. V. Zaitseva^{1, *}, M. A. Kallistratova¹, V. S. Luyluykin^{1, 3}, R. D. Kouznetsov²,
D. D. Kuznetsov¹, and N. V. Vazaeva^{1, 3}

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Science, Pyzhevskii per., 3, Moscow, 119017 Russia*

²*Finnish Meteorological Institute, Erik Palménin aukio, 1, Helsinki, FI-00101 Finland*

³*Bauman Moscow State University, 2nd Baumanskaya, 5, Moscow, 105005 Russia*

**e-mail: zaycevad@gmail.com*

The paper presents study of the parameters of wave-like structures based on the data of long-term continuous sodar monitoring of the atmospheric boundary layer (ABL). Submesoscale internal gravity waves (IGWs) of non-orographic origin trapped in a stably stratified ABL (SBL) are considered. Statistical data on the parameters of two classes of IGWs are presented: internal gravity-shear waves (IGSWs) of the Kelvin-Helmholtz billow (KHB) type and buoyancy waves (BW). Identification and classification of IGWs was carried out by the visual analysis of sodar echograms. The measurements carried out in the Moscow region were used. The seasonal and diurnal variability of the frequency of registration of waves of both classes were studied, the values of the parameters of the observed waves were analyzed, and the ranges and average values of these quantities were compared.

Keywords: sodar, stable atmospheric boundary layer, internal gravity waves, Kelvin–Helmholtz billows, buoyancy waves